

ตัวควบคุมสำหรับวิชวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ

นายอัศวิน แซ่ตั้ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-533-556-8

**STEREO IMAGE JACOBIAN BASED CONTROLLER  
FOR VISUAL SERVO**

**Arswin Saetang**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**


**Academic Year 2005**

**ISBN 974-533-556-8**

## ตัวควบคุมสำหรับวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ

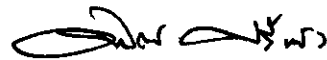
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



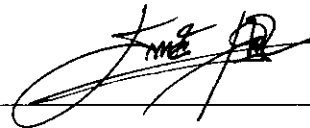
(ผศ. ดร.กิตติ อัดถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณี รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ชำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อัศวิน แซ่ตั้ง : ตัวควบคุมสำหรับวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ  
(STEREO IMAGE JACOBIAN BASED CONTROLLER FOR VISUAL SERVO)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 109 หน้า, ISBN 974-533-556-8

การควบคุมแบบขับเคลื่อนเชิงภาพ หรือวิซวลเซอร์โว (visual servo) เป็นวิธีการหนึ่งในการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล โดยอาศัยความสัมพันธ์ของภาพเป้าหมายและข้อมูลข้อต่อจากแขนกล ในงานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคในการควบคุมแบบใหม่เพื่อใช้ในการควบคุมขับเคลื่อนเชิงภาพ โดยใช้การวางแผนทางเดินแบบออนไลน์สำหรับหุ่นยนต์แขนกล จึงทำให้สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นพลวัตได้ เทคนิคที่นำเสนอนี้ใช้ข้อมูลภาพที่ไม่ต้องทำการปรับเทียบมาทำการขับเคลื่อนแขนกล ทำให้ไม่ต้องการข้อมูลทางด้านจลนศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล ที่ซึ่งต้องศึกษาถึงลักษณะของหุ่นยนต์แขนกลแต่ละตัว จึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้เทคนิควิธีนี้กับหุ่นยนต์แขนกลใดๆ นอกจากนั้นวิธีการนี้ยังสามารถใช้คำสั่งโดยตรงกับข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกลได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิควิธีการใหม่โดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัตเพื่อใช้ในการควบคุมขับเคลื่อนหุ่นยนต์แขนกลแบบ 4 องศาอิสระ โดยติดตั้งกล้องจำนวนสองตัว ในการขับเคลื่อนเชิงภาพเพื่อที่จะสั่งงานให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมาย ซึ่งสามารถที่จะทำงานได้โดยไม่ต้องทำการปรับเทียบทั้งแขนกลและกล้อง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนักศึกษา อัศวิน แซ่ตั้ง  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อาทิตย์ ศรีแก้ว

ARSWIN SAETANG : STEREO IMAGE JACOBIAN BASED

CONTROLLER FOR VISUAL SERVO. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. ARTHIT SRIKAEW, Ph.D. 109 PP. ISBN 974-533-556-8

VISUAL SERVO/ROBOT MANIPULATOR CONTROL/CALIBRATION/STEREO  
IMAGE JACOBIAN

Visual servo is a method to control robot manipulator using both image and robot information. In this thesis, stereo image Jacobian has been developed and applied to control a 4-DOF robot manipulator with two cameras mounted on it. The proposed dynamic estimation of stereo image Jacobian allows the system to achieve visual servoing without any calibration of the camera or robot and any robot kinematics. The robot trajectory can then be planned online which provides the system to work in an undetermined environment. The proposed technique can also be used to directly drive motors of the robot joints.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2005

Student's Signature อาร์สวิน สายตัง

Advisor's Signature อาร์ทิต ศรีcae

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในทุกๆด้าน ที่เกิดประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยคงมีอาจจะเลยที่จะกล่าวถึง บุคคล กลุ่มบุคคล และคณะ ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบในการทำวิจัย ด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติ อรรถกัจจิมงคล ดร. ธนัชชัย กุลวรรณิษพงษ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณอัญชุลี รักด่านกลาง คุณภัทรารวรรณ สิทธิกวินกุล และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ พี่ภาณุพงษ์ เพชรเลิศ ที่ได้ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในทุกๆด้านจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจ รวมทั้งคอยช่วยเหลือทางด้านต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ธนัญชนก ภารกุล และ ชนิดาภา มาลาพันธ์ ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา ในยามทุกข์และเวลาที่ผู้วิจัยท้อแท้ ก็ช่วยให้ผู้วิจัยมีกำลังใจที่จะเผชิญกับปัญหา ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ ไม่ว่าผู้วิจัยจะเกิดปัญหาอะไรก็เข้าใจผู้วิจัยเสมอมา อีกทั้งให้การอบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมทางการศึกษาของผู้วิจัยอย่างดีที่สุดมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อัศวิน แซ่ตั้ง

# สารบัญ

## หน้า

|                                                        |          |
|--------------------------------------------------------|----------|
| บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....                                 | ก        |
| บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ) .....                             | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ .....                                  | ค        |
| สารบัญ .....                                           | ง        |
| สารบัญตาราง .....                                      | ช        |
| สารบัญภาพ .....                                        | ซ        |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ .....                                | ฎ        |
| <b>บทที่</b>                                           |          |
| <b>1 บทนำ.....</b>                                     | <b>1</b> |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา.....                             | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....                   | 2        |
| 1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....                              | 3        |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....                             | 3        |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                     | 3        |
| 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ .....                     | 4        |
| <b>2 ปรัชญาธรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>       | <b>5</b> |
| 2.1 บทนำ.....                                          | 5        |
| 2.2 การควบคุมแบบวิซวลเซอร์โว .....                     | 5        |
| 2.3 การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องโดยใช้วิซวลเซอร์โว ..... | 10       |
| 2.3.1 การมองเห็นแบบเดี่ยว.....                         | 11       |
| 2.3.2 การมองเห็นแบบกล้องคู่.....                       | 11       |
| 2.3.3 การมองเห็นแบบใช้กล้องหลายตัว.....                | 12       |
| 2.4 สรุป .....                                         | 12       |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>การควบคุมขับเคลื่อนแกนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โว .....</b>                    | <b>13</b> |
| 3.1      | บทนำ .....                                                                   | 13        |
| 3.2      | วิธีในการควบคุมแกนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โว .....                               | 13        |
| 3.2.1    | การใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม .....                               | 14        |
| 3.2.2    | การนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อของแกนกล .....                              | 14        |
| 3.2.3    | ลักษณะการเฝ้าวัตถุ.....                                                      | 16        |
| 3.3      | ทฤษฎีการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ .....                                    | 17        |
| 3.3.1    | จาโคเบียนรูปภาพ .....                                                        | 17        |
| 3.3.2    | การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต .....                                    | 20        |
| 3.3.3    | การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพในจุดเริ่มต้น .....                               | 21        |
| 3.3.4    | ทิศทางในการปรับตำแหน่งของข้อต่อแกนกล.....                                    | 21        |
| 3.3.5    | การเลือกขนาดของการก้าวเดิน .....                                             | 22        |
| 3.3.6    | เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม.....                                             | 22        |
| 3.4      | การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต.....                             | 24        |
| 3.4.1    | ข้อจำกัดของการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต.....                          | 24        |
| 3.4.2    | หลักการของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ.....                                       | 24        |
| 3.4.3    | การทำงานของ การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ<br>แบบพลวัต.....             | 27        |
| 3.4.4    | การใช้งานจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอร่วมกับเมตริกซ์<br>จาโคเบียนผกผันเทียม ..... | 29        |
| 3.5      | สรุป .....                                                                   | 30        |
| <b>4</b> | <b>องค์ประกอบของระบบ.....</b>                                                | <b>31</b> |
| 4.1      | บทนำ.....                                                                    | 31        |
| 4.2      | ส่วนประกอบต่างๆของแกนกลทดสอบ .....                                           | 31        |
| 4.2.1    | แกนกลที่ใช้ในการทดสอบ .....                                                  | 31        |
| 4.2.2    | รายละเอียดของชุดควบคุมแกนกลทดสอบ .....                                       | 32        |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 การติดตั้งกล้องร่วมกับเซนเซอร์ทดสอบ .....                                              | 33        |
| 4.4 การรับ-ส่งข้อมูล .....                                                                 | 33        |
| 4.4.1 การส่งผ่านข้อมูลระหว่างตัวควบคุมกับคอมพิวเตอร์แบบอนุกรม .....                        | 33        |
| 4.4.2 การรับภาพจากกล้องโดยผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อ .....                                       | 34        |
| 4.5 การออกแบบและสร้างโปรแกรมควบคุมเซนเซอร์ขั้นพื้นฐาน .....                                | 35        |
| 4.5.1 การแสดงภาพที่ได้รับมาจากกล้อง .....                                                  | 36        |
| 4.5.2 การจำลองการทำงานของเซนเซอร์ .....                                                    | 36        |
| 4.5.3 การแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ .....                         | 38        |
| 4.6 สรุป .....                                                                             | 39        |
| <b>5 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....</b>                             | <b>40</b> |
| 5.1 บทนำ .....                                                                             | 40        |
| 5.2 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์โดยใช้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต .....                     | 40        |
| 5.2.1 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์ที่องศาอิสระต่างๆ .....                                        | 43        |
| 5.2.2 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์ที่ค่าขนาดของการก้าวเดินต่างๆ .....                            | 45        |
| 5.3 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์โดยใช้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ<br>แบบพลวัต .....         | 53        |
| 5.3.1 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์ที่องศาอิสระต่างๆ .....                                        | 55        |
| 5.3.2 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์ที่ค่าขนาดของการก้าวเดินต่างๆ .....                            | 56        |
| 5.3.3 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์ที่การวางวัตถุตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่<br>ทำงานของเซนเซอร์ ..... | 60        |
| 5.3.4 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์โดยวัตถุมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่าง<br>การเคลื่อนที่ .....    | 63        |
| 5.3.5 การทดสอบควบคุมเซนเซอร์เมื่อวัตถุเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง .....                       | 67        |
| 5.3 สรุป .....                                                                             | 69        |
| <b>6 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>                                                           | <b>70</b> |
| 6.1 สรุป .....                                                                             | 70        |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2 ข้อเสนอแนะ .....                                               | 71  |
| รายการอ้างอิง .....                                                | 73  |
| ภาคผนวก                                                            |     |
| ภาคผนวก ก. การประมวลผลภาพ .....                                    | 75  |
| ภาคผนวก ข. ตัวอย่างผลทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม..... | 80  |
| ภาคผนวก ค. แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของแขนกลทดสอบ .....                 | 95  |
| ภาคผนวก ง. รายละเอียดทางเทคนิคของแขนกลทดสอบ.....                   | 100 |
| ภาคผนวก จ. รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องที่ใช้ในการทดสอบ.....        | 104 |
| ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....        | 107 |
| ประวัติผู้เขียน .....                                              | 109 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                 | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.1 ตัวอย่างของข้อมูลการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพที่องศาอิสระต่างๆ..... | 53   |
| ข.1 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพที่ 1 องศาอิสระ .....          | 82   |
| ข.2 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ .....          | 83   |
| ข.3 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ .....          | 85   |
| ข.4 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ .....          | 87   |
| ข.5 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพสเตอริโอที่ 3 องศาอิสระ .....  | 89   |
| ข.6 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเป็นรูปภาพสเตอริโอที่ 4 องศาอิสระ .....  | 91   |
| ค.1 พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนสำหรับแขนกลแบบ SCORBOT ER-III.....             | 97   |
| ง.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกลทดสอบ.....                                    | 102  |
| ง.2 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ.....                               | 103  |
| จ.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของกล้องทดสอบ .....                         | 106  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า                                                                                |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1    | รูปแบบของการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยระบบวิซวลเซอร์โว..... 5                               |
| 2.2    | โครงสร้างการควบคุมของ Feddema และคณะ..... 7                                         |
| 2.3    | โครงสร้างของการติดตั้งกล้องร่วมกับแขนกลที่ใช้ในวิซวลเซอร์โว..... 10                 |
| 3.1    | โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต ..... 15             |
| 3.2    | โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต..... 15    |
| 3.3    | โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งแบบจับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง..... 16            |
| 3.4    | โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพแบบจับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง ..... 16 |
| 3.5    | ผังการทำงานควบคุมแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ..... 18             |
| 3.6    | แผนผังการทำงานของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ ..... 27                                |
| 4.1    | ส่วนประกอบต่างๆของแขนกลทดสอบ ..... 31                                               |
| 4.2    | แขนกลทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย ..... 32                                                 |
| 4.3    | ชุดควบคุมของแขนกลทดสอบ ..... 32                                                     |
| 4.4    | การติดตั้งกล้องแบบสเตอริโอที่ปลายแขนกล..... 33                                      |
| 4.5    | การทำงานของระบบในการรับ-ส่งข้อมูล ..... 34                                          |
| 4.6    | การทำงานระหว่างกล้อง อุปกรณ์เชื่อมต่อ และคอมพิวเตอร์..... 35                        |
| 4.7    | องค์ประกอบโดยรวมของระบบ ..... 35                                                    |
| 4.8    | ภาพที่ได้รับจากกล้องทั้งสองและการประมวลผลหาจุดศูนย์กลางภาพและวัตถุ ..... 36         |
| 4.9    | การจำลองการทำงานของแขนกลในมุมมองต่างๆ ..... 37                                      |
| 4.10   | การจำลองการทำงานของแขนกลแบบสามมิติ..... 37                                          |
| 4.11   | กราฟองศาการเคลื่อนที่แต่ละข้อต่อของแขนกล ..... 38                                   |
| 4.12   | การเชื่อมต่อกับผู้ใช้แบบกราฟิก (graphic user interface หรือ GUI) ของระบบ ..... 38   |
| 5.1    | ตัวอย่างการลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม..... 43                                      |

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า                                                                                                                 |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5.2    | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่องศาอิสระ ..... 44                                                         |
| 5.3    | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ<br>ที่ 1 องศาอิสระและ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 47 |
| 5.4    | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ<br>ที่ 2 องศาอิสระและ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 48 |
| 5.5    | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ<br>ที่ 3 องศาอิสระและ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 49 |
| 5.6    | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ<br>ที่ 4 องศาอิสระและ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 50 |
| 5.7    | การเปรียบเทียบขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 3 องศาอิสระ และ<br>2 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 51                            |
| 5.8    | การเปรียบเทียบขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 4 องศาอิสระ และ<br>2 พารามิเตอร์รูปภาพ ..... 52                            |
| 5.9    | การเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายของแขนกล ..... 54                                                                    |
| 5.10   | มุมมองกล้องในการเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายซึ่งใช้การขับเคลื่อน<br>โดยอาศัยภาพ ..... 54                            |
| 5.11   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ 3 องศาอิสระ ..... 56                                              |
| 5.12   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ 4 องศาอิสระ ..... 56                                              |
| 5.13   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 ..... 58                                         |
| 5.14   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075 ..... 58                                        |
| 5.15   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ..... 59                                          |
| 5.16   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 ..... 59                                         |
| 5.17   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075 ..... 60                                        |
| 5.18   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ..... 60                                          |
| 5.19   | การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.05 ..... 61                        |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                                                          | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.20 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.05 .....                                                                  | 61   |
| 5.21 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.075 .....                                                                | 62   |
| 5.22 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.075 .....                                                                 | 62   |
| 5.23 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.1 .....                                                                  | 63   |
| 5.24 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดิน<br>เท่ากับ 0.1 .....                                                                   | 63   |
| 5.25 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่าง<br>การเคลื่อนที่เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 ที่ 4 องศาอิสระ .....                  | 65   |
| 5.26 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่าง<br>การเคลื่อนที่เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ที่ 4 องศาอิสระ .....                   | 65   |
| 5.27 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างต่อเนื่อง<br>ในระหว่างการเคลื่อนที่ เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ที่ 4 องศาอิสระ..... | 69   |
| ก.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์ .....                                                                                                                       | 77   |
| ค.1 การทำงานของแขนกลแบบ SCORBOT ER-III .....                                                                                                                    | 97   |
| ง.1 แขนกล SCORBOT-ER III.....                                                                                                                                   | 101  |
| ง.2 ขนาดและขอบเขตการทำงานของแขนกล .....                                                                                                                         | 103  |
| จ.1 กล้องที่นำมาทดสอบ .....                                                                                                                                     | 105  |
| จ.2 รายละเอียดขนาดของกล้อง .....                                                                                                                                | 105  |

## คำอธิบายสัญลักษณ์

|                  |                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $n$              | คือ จำนวนข้อต่อ                                                     |
| $m$              | คือ จำนวนพารามิเตอร์รูปภาพ                                          |
| $p$              | คือ จำนวนตำแหน่งปลายแขนกล                                           |
| $\theta$         | คือ เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่ง                                          |
| $\bar{r}$        | คือ เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของปลายแขนกลเทียบกับแกนอ้างอิงคาร์ทีเซียน |
| $\bar{f}$        | คือ เวกเตอร์ที่แสดงค่าพารามิเตอร์รูปภาพ                             |
| $\dot{\theta}$   | คือ เวกเตอร์ความเร็วข้อต่อแขนกล                                     |
| $\dot{r}$        | คือ เวกเตอร์ความเร็วปลายแขนกล                                       |
| $\dot{f}$        | คือ เวกเตอร์ความเร็วพารามิเตอร์รูปภาพ                               |
| $J$              | คือ จาโคเบียนของแขนกล                                               |
| $J_r$            | คือ จาโคเบียนของพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับแขนกล                      |
| $J_\theta$       | คือ จาโคเบียนรูปภาพ                                                 |
| $\Delta\theta$   | คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแขนกล                                   |
| $\Delta f$       | คือ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ                              |
| $DQ$             | คือ เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแขนกล                           |
| $DF$             | คือ เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพารามิเตอร์รูปภาพ               |
| $k$              | คือ ช่วงก้าวเดิน                                                    |
| $J_\theta^+$     | คือ เมตริกซ์จาโคเบียนรูปภาพผกผันเทียมที่เหมาะสม                     |
| $b$              | คือ เวกเตอร์ใดๆ                                                     |
| $\dot{f}_{1,2}$  | คือ เวกเตอร์ความเร็วพารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอ                       |
| $J_{r,2}$        | คือ จาโคเบียนของพารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอเทียบกับแขนกล              |
| $J_{\theta,2}$   | คือ จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ                                         |
| $\Delta f_{1,2}$ | คือ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอ                      |
| $DF_{1,2}$       | คือ เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอ       |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการนำเอาหุ่นยนต์มาใช้งานในชีวิตประจำวันเริ่มแพร่หลาย การใช้งานดังกล่าวมีความใกล้ชิดกับมนุษย์มากยิ่งขึ้น ส่วนหนึ่งที่สามารถทำให้ทำให้หุ่นยนต์มีความชาญฉลาดมากขึ้นคือการเพิ่มปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) ให้กับหุ่นยนต์ ในระบบการโต้ตอบระหว่างผู้ใช้กับหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่เกิดขึ้นมากที่สุดในการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ได้มีการพัฒนาไปหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์จะสามารถโต้ตอบ (interact) กับมนุษย์ได้ถูกต้องในเชิงกายภาพก็ต่อเมื่อหุ่นยนต์สามารถรับรู้พิกัดตำแหน่งของเป้าหมายเทียบกับจุดอ้างอิงหนึ่งๆได้ ความสามารถในการรับรู้พิกัดดังกล่าวทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่นการประมวลผลจากตัวตรวจจับระยะทาง (อินฟราเรด เลเซอร์ ฯลฯ) อย่างไรก็ตาม การใช้อุปกรณ์ตรวจจับดังกล่าวมีข้อดีและข้อจำกัดในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นการส่งคลื่นออกไปกระทบกับเป้าหมาย ซึ่งถ้าเป็นมนุษย์ผู้ใช้งาน อาจก่อให้เกิดผลกระทบที่ไม่ดีได้

เพื่อให้หุ่นยนต์มีศักยภาพและสามารถทำงานได้หลากหลายมากขึ้น ได้มีงานวิจัยเกิดขึ้นมากมายเพื่อพัฒนาให้หุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม ความสามารถดังกล่าวจะทำให้หุ่นยนต์สามารถปรับการทำงานให้สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมเพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างถูกต้อง การพัฒนารวมถึงการเพิ่มความสามารถในการรับรู้ของหุ่นยนต์ และ/หรือ การพัฒนาสมองกลหรือปัญญาประดิษฐ์

กล้อง CCD (charge coupled device) เป็นอุปกรณ์รับรู้ชนิดหนึ่งที่ค่อนข้างแพร่หลายในปัจจุบัน กล้องจะทำการบันทึกภาพซึ่งให้ข้อมูลของสภาพแวดล้อม กล้องอาจนำมาใช้กับหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมผ่านทางสิ่งที่กล้องมองเห็น การทำงานจะคล้ายกับดวงตาของมนุษย์ การรับรู้ภาพของหุ่นยนต์ทำให้หุ่นยนต์สามารถติดตามวัตถุเป้าหมาย หรือทำการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางอย่างอัตโนมัติได้ กล้องจะทำการบันทึกภาพในรูปแบบดิจิทัล รูปแบบข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาประมวลผลได้โดยตรงโดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีสมรรถนะที่สูงมากในปัจจุบัน การใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจจับของหุ่นยนต์จึงเป็นการนำเอาเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้เพื่อให้หุ่นยนต์มีศักยภาพที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยด้านนี้ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป เนื่องจากจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับหลายสาขาวิชา รวมถึงพลศาสตร์ขั้นสูง



ทฤษฎีการควบคุม คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การบันทึกภาพ และทฤษฎีหุ่นยนต์

การขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) เป็นการรวมกันของศาสตร์หลายๆแขนง ซึ่งประกอบไปด้วย การประมวลผลภาพความเร็วสูง (high-speed image processing) จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ (kinematics) พลวัตการเคลื่อนที่ (dynamic) ทฤษฎีการควบคุม (control theory) และการคำนวณโดยใช้เวลาจริง (real-time computing) ในบางงานวิจัยได้แสดงถึงการรวมกันของ การมองเห็นแบบไวงาน (active vision) และ โครงสร้างจากการเคลื่อนที่ (structure from motion) แต่ในความเป็นจริงเรามักจะอธิบายการใช้การมองเห็นในการแบ่งระดับงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์ การพัฒนาระบบการขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) ที่ซึ่งใช้ระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ร่วมในการระบุพิกัดของเป้าหมายเทียบกับหุ่นยนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในงานทางด้านนี้ เนื่องจากระบบการขับเคลื่อนเชิงภาพในงานวิจัยนี้ไม่ต้องการความรู้ทางด้านพลศาสตร์ชั้นสูง ทฤษฎีหุ่นยนต์ ที่ซึ่งประกอบไปด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ ต่างๆทั้งจลนศาสตร์ไปหน้า (forward kinematics) และจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics) ซึ่งยากต่อการที่จะเข้าใจ และมีความแตกต่างกันอย่างมากในการหาสมการควบคุมหุ่นยนต์แต่ละตัว

การขับเคลื่อนเชิงภาพในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลพิกัดจากภาพ (จากกล้องที่ติดอยู่กับแขนกล) กับข้อมูลพิกัดจากหุ่นยนต์แขนกล (เช่นมุมข้อต่อแขนกล) เพื่อทำการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายเทียบกับตัวหุ่นยนต์ แล้วทำการพัฒนาระบบการขับเคลื่อนเชิงภาพ โดยใช้หุ่นยนต์แขนกล SCORBOT-ER III ติดตั้งร่วมกับกล้อง CCD เพื่อทำการประมวลผลหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ต้องการให้หุ่นยนต์แขนกลเอื้อมไปหาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาถึงการนำกล้อง CCD มาใช้เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมในการทำงาน เพื่อให้หุ่นยนต์มีใสรับรู้ในการทำงานใกล้เคียงกับมนุษย์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการติดตั้งระบบกล้อง CCD ให้กับหุ่นยนต์แขนกล และพัฒนาวิธีในการนำข้อมูลจากระบบกล้อง CCD มาใช้ในการควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ และถูกต้องแม่นยำ การศึกษานี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญเพื่อรองรับเทคโนโลยีดังกล่าว ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาเทคโนโลยีต่างๆ ที่จำเป็นในการนำกล้อง CCD มาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความรู้หลายสาขาวิชา การศึกษาจะเป็นพื้นฐานสำคัญเพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์แขน

กลอุตสาหกรรมซึ่งจะเข้ามามีบทบาทในอนาคตอันใกล้ ทำให้มีศักยภาพในการแข่งขันมากขึ้น วัตถุประสงค์ที่กล่าวถึงประกอบไปด้วย

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้การป้อนกลับด้วยภาพ
- 2) เพื่อพัฒนาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล โดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. กล้องที่ใช้ทำหน้าที่รับภาพในแขนกลนี้เป็นกล้อง CCD ชนิดสีจำนวน 2 ตัว
2. กล้องชนิดสีจะได้รับการติดตั้งอยู่บนส่วนปลายของแขนกลทั้ง 2 ตัว
3. ระบบต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของแสงที่กำหนด ในที่นี้ใช้สภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการศึกษานี้ จะรวมถึง

1. พัฒนาวิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล SCORBOT®-ER III ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC.
2. ออกแบบและสร้างโปรแกรมควบคุมสำหรับหุ่นยนต์แขนกล SCORBOT®-ER III ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC. เพื่อใช้แทนโปรแกรมควบคุมมาตรฐานของหุ่นยนต์แขนกล เพื่อเป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัย
3. ทดลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลด้วยระบบกล้องแบบจาโคเบียนรูปภาพ กับหุ่นยนต์แขนกล SCORBOT®-ER III
4. ทดลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลด้วยระบบกล้องแบบจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ กับหุ่นยนต์แขนกล SCORBOT®-ER III

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้การป้อนกลับด้วยภาพ
2. ได้วิธีการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ ที่ซึ่งไม่ต้องทำการปรับเทียบทั้งแขนกลและกล้อง
3. สามารถควบคุมแขนกลให้หยิบจับวัตถุเป้าหมายที่สนใจได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว
4. สามารถนำวิธีการที่พัฒนาไปใช้กับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมได้จริง

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท และ 6 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะกล่าวถึงประวัติการวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องการควบคุมแบบวิซวลเซอร์โวในอดีต รวมถึงการควบคุมโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยกล้อง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงแนวทางการพัฒนางานวิจัยที่ผ่านมาและสิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้

บทที่ 3 กล่าวถึงการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลด้วยระบบกล้อง ซึ่งอธิบายถึงวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้อย่างละเอียด และรวมถึงการแสดงผลที่ได้ในการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์แขนกล ซึ่งจะแสดงให้เห็นจุดเด่นของวิธีการ ทั้งในเรื่องของโครงสร้างของระบบที่ไม่ซับซ้อน และไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้ได้กับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมทั่วไป

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดของส่วนต่างๆของแขนกลทดสอบ การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างแขนกลทดสอบกับคอมพิวเตอร์ การรับข้อมูลภาพจากกล้อง การติดตั้งกล้องบนแขนกลทดสอบ การออกแบบและสร้างโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทดสอบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการติดตั้ง รวมถึงการใช้งานแขนกลทดสอบในขั้นพื้นฐาน เพื่อที่จะสามารถสร้างโปรแกรมควบคุมแขนกลได้ต่อไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบควบคุมขับเคลื่อนแขนกลทดสอบแบบอัตโนมัติด้วยวิธีต่างๆ รวมถึงผลกระทบของการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม และความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุของแขนกลทดสอบอย่างละเอียด ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงข้อดี และข้อเสียของการควบคุมแบบต่างๆ ในรูปของตารางและกราฟแสดงผลการทดสอบ

บทที่ 6 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. การประมวลผลภาพ

ภาคผนวก ข. รายละเอียดข้อมูลการทดสอบโปรแกรมกับหุ่นยนต์แขนกล

ภาคผนวก ค. แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของแขนกลทดสอบ

ภาคผนวก ง. รายละเอียดทางเทคนิคของแขนกลทดสอบ

ภาคผนวก จ. รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องที่ใช้ในการทดสอบ

ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทที่ 2

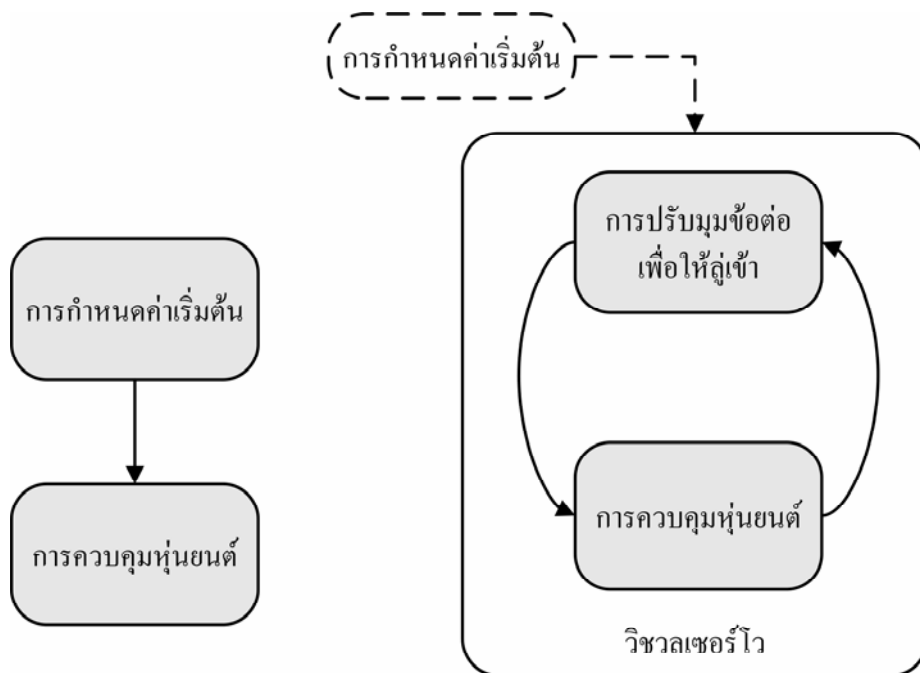
### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องโดยใช้วิซวลเซอร์โว

#### 2.2 การควบคุมหุ่นยนต์แบบวิซวลเซอร์โว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยใช้วิธีป้อนกลับจากภาพ เริ่มมีการเผยแพร่ครั้งแรกในปี 1979 โดย J. Hill และ W.T. Park ในงานวิจัยเรื่อง การควบคุมแบบเวลาจริงสำหรับหุ่นยนต์กับกล้องแบบเคลื่อนที่ (Hill and Park, 1979) โดยในบทนำของงานวิจัยนี้ได้แนะนำคำศัพท์ “Visual Servoing” (การขับเคลื่อนเชิงภาพ) ขึ้นซึ่งเป็นการป้อนกลับตำแหน่งเพื่อใช้ในการควบคุมปลายแขนกลที่สัมพันธ์กับวัตถุเป้าหมาย



ก) การควบคุมหุ่นยนต์แบบวงรอบเปิด ข) การควบคุมด้วยระบบวิซวลเซอร์โว

รูปที่ 2.1 รูปแบบของการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยระบบวิซวลเซอร์โว

งานวิจัยที่มีบทบาทในยุคต้นของการขับเคลื่อนเชิงภาพ เกิดขึ้นในต้นทศวรรษ 1980 โดยได้มีการนำเสนองานวิจัยในเรื่อง การควบคุมขับเคลื่อนเชิงภาพแบบพลวัตของหุ่นยนต์: การปรับตัวโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (dynamic visual servo control of robots: an adaptive image-based approach) (Sanderson and Weiss, 1985) โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งพฤติกรรมการป้อนกลับด้วยภาพเป็น 4 ประเภทคือ

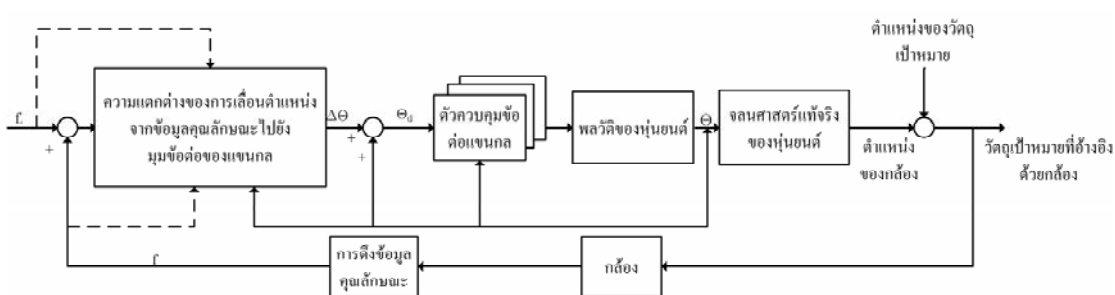
1. การมองแล้วเคลื่อนที่ (static look and move)
2. การมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต (dynamic look and move)
3. การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้ตำแหน่ง (position based visual servoing)
4. การขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (image based visual servoing)

การมองแล้วเคลื่อนที่ (static look and move) จะมีการทำงานแบบเป็นลำดับ กล่าวคือใช้กล้องในการมองเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ จากนั้นใช้ตัวควบคุมของแขนกลเพื่อขับเคลื่อนแขนกลให้เข้าไปสู่เป้าหมาย และอาจทำขบวนการนี้ซ้ำเพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำมากขึ้น (ซึ่งจะเป็นการควบคุมที่เรียกว่า การมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต หรือ dynamic look and move) ส่วนลักษณะพฤติกรรมของการขับเคลื่อนเชิงภาพ จะใช้ระบบกล้องทำการจับข้อต่อแขนกลโดยตรง นั่นก็คือมันจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมด้วยการอาศัยตำแหน่ง (position based) หมายถึงการใช้ตำแหน่งในแกนอ้างอิงในการอธิบายการเคลื่อนที่ ส่วนการเคลื่อนที่โดยอาศัยภาพ (image based) นั้นจะใช้ตำแหน่งในรูปภาพแทน และมักจะนิยามความคลาดเคลื่อนในรูปของพารามิเตอร์รูปภาพ (image parameter)

ในปี 1987 Sanderson และ Weiss ได้เริ่มมีการเผยแพร่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพเป็นครั้งแรก ในงานวิจัยเรื่อง การควบคุมขับเคลื่อนเชิงภาพแบบพลวัตของหุ่นยนต์: การปรับตัวโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ โดยในงานนี้ได้มีการนำการขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยอาศัยพารามิเตอร์รูปภาพมาใช้ในการควบคุมแขนกล โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวัตถุในรูปภาพโดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องแปลงออกมาเป็นตำแหน่งของวัตถุ และต่อมาไม่นาน Kase และคณะ (Kase, et.al., 1993) ได้เรียกความสัมพันธ์ของเมตริกซ์การแปลงนี้ว่า จาโคเบียนรูปภาพ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ทำเพียงเฉพาะแบบจำลองเท่านั้น และระบุว่าหลักการนี้ใช้ได้เพียงระบบที่มีความอิสระ (degree of freedom) ไม่เกิน 3 และจะมีปัญหาเกิดขึ้นเมื่อระบบมีความอิสระเท่ากับ 5 หลังจากนั้น ได้มีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มที่ทำการทดลองโดยใช้หลักการของ Sanderson และ Weiss

ต่อมาไม่นาน Kabuka และคณะ (1988) ได้นำการใช้กล้องเคลื่อนที่ในการติดตามวัตถุ โดยกล้องจะเลื่อนและปรับสเกลโดยการใช้ข้อมูลจุดศูนย์กลางของวัตถุและพื้นที่ทำงาน ซึ่งใช้เทคนิคของการควบคุมแบบปรับตัว

Feddema และคณะ (1991) ได้นำเสนองานวิจัยที่มีบทบาทมากที่แสดงถึงการทดลองปฏิบัติกับระบบที่มีความซับซ้อนมากในวิธีการควบคุมจะเลือกใช้ลักษณะของวัตถุ (image feature) อย่างอัตโนมัติเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุเป้าหมายกับปลายแขนกล กล้องจะติดที่ปลายแขนกล การเลือกใช้ลักษณะของวัตถุก็เพื่อให้รูปภาพที่ได้มีความสมบูรณ์ ดีความวัตถุได้ง่าย และมีลักษณะที่พิจารณาามีความเป็นเอกลักษณ์ และรวมถึงการควบคุมที่มีความสามารถในการควบคุมได้ (controllability) และ ความสามารถในการสังเกตได้ (observability) และมีความไว (sensitivity) ที่ดี



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการควบคุมของ Feddema และคณะ

ในปี 1996 Corke และ Good ได้ทดลองศึกษาผลทางพลศาสตร์ที่มีต่อการควบคุมแบบการป้อนกลับด้วยรูปภาพ บทความนี้แยกความแตกต่างระหว่างการควบคุมด้วยรูปภาพแบบจลนศาสตร์ (kinematic) กับแบบพลศาสตร์ (dynamic) การทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพที่ผ่านมาจะพิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ปรากฏบนรูปภาพกับตำแหน่งของวัตถุ แต่จากการทำงานของระบบกล้องที่มีเวลาแฝง (latency) เนื่องจากต้องใช้เวลาในระยะหนึ่งในการประมวลผลรูปภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลตามที่ต้องการ การพิจารณาถึงพลศาสตร์ของระบบทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในปีเดียวกันนั้น Wilson, Williams และ Bell (1996) ได้นำเสนอวิธีการควบคุมปลายแขนกลของหุ่นยนต์โดยใช้การป้อนกลับด้วยรูปภาพแบบอาศัยตำแหน่ง (position based) บทความนี้แสดงถึงการควบคุมแบบครบวงจร ตั้งแต่การคำนวณตำแหน่งของวัตถุเทียบกับตัวกล้อง ไปจนถึงการทดลองควบคุม

ในช่วงเวลาเดียวกัน Hashimoto, Ebine และ Kimura (1996) ได้นำเทคนิคการควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (optimal control) มาใช้ในการควบคุมป้อนกลับด้วยรูปภาพ การควบคุมจะพิจารณาจำนวนลักษณะของวัตถุมากกว่าความอิสระของเป้าหมาย แล้วใช้เทคนิคการควบคุมแบบได้ผลดี

ที่สุดจัดการกับลักษณะของวัตถุที่เกินมา และได้ทำการทดลองกับหุ่นยนต์แขนกล PUMA 560 โดยทำการติดตั้งกล้องไว้ที่ปลายแขนกล

Khudraoui และคณะ (1996) ได้ใช้เลเซอร์สองตัวยิงแสงในแนวระนาบเพื่อให้กล้องสามารถมองหาลักษณะของวัตถุในรูปภาพได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การใช้แสงเลเซอร์จะทำให้หมดปัญหาเกี่ยวกับแสงภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ แสงภายนอกจะทำให้รูปภาพที่บันทึกมีข้อมูลมากกว่าที่ต้องการ และทำให้ต้องใช้ความพยายามสูงในการประมวลผลรูปภาพเนื่องจากรูปภาพมีความซับซ้อนมาก เลเซอร์แก้ปัญหานี้โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นเฉพาะข้อมูลวัตถุตามแนวภาพฉายของเลเซอร์เท่านั้น

Rafael Kelly (1996) ได้พิสูจน์เสถียรภาพของการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพกับหุ่นยนต์แนวราบสองแกน (planar robots) โดยติดตั้งกล้องอยู่กับที่และกล้องสามารถมองเห็นปลายแขนกลและวัตถุเป้าหมาย และแสดงความทนทานของการควบคุมต่อความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์เช่น ความยาวโพกัสหรือมุมในการวางกล้อง

Corke และคณะ (1996) ได้สรุปแนวคิดที่ผ่านมามีทั้งหมดเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยรูปภาพ และรวมถึงพื้นฐานศาสตร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุม รวมถึงการแปลงแกนระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งในรูปภาพและวิธีในการควบคุม ปัจจุบันยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมด้วยรูปภาพเกิดขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก ทั้งในเรื่องของกรรมวิธีในการหาลักษณะวัตถุจากภาพที่บันทึก ทั้งในเรื่องของความเร็วและความละเอียด การหาจาโคเบียนที่มีประสิทธิภาพขึ้น การนำเอาระบบฟัซซี (fuzzy inference system) ระบบปัญญาประดิษฐ์ หรือโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยในกรรมวิธีต่างๆ การควบคุมติดตามวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง การควบคุมร่วมกับวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ

Sutanto, Sharma และ Venugopal (1997) ได้ใช้การประมาณหาจาโคเบียนจากการเคลื่อนที่วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องมีสมการจาโคเบียนในตอนต้น แต่จะใช้วิธีการประมาณขึ้นจากข้อมูลการเคลื่อนที่โดยการพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อว่ามีความไวต่อการเปลี่ยนพารามิเตอร์รูปภาพอย่างไร และได้จำลองและทดลองควบคุมกับหุ่นยนต์ที่มีความอิสระเท่ากับ 6

Sun และ Doeschner (1999) ได้ใช้การขับเคลื่อนเชิงภาพกับระบบพลวัตของหุ่นยนต์โดยใช้โครงข่ายโคโฮเนน ซึ่งสามารถลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของการคำนวณและการปรับเทียบ เพราะความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแรงบิดของหุ่นยนต์ และคุณลักษณะของการมองเห็น ไม่มีความเป็นอิสระเชิงเส้นสูง ซึ่งเทคนิคนี้สามารถสร้างระบบการขับเคลื่อนเชิงภาพที่ยืดหยุ่นสูง แต่ยังสามารถทำได้เพียงเฉพาะแบบจำลองเท่านั้น

Zekharov และ Halász (1999) ได้นำวิธีการระบุเอกลักษณ์สำหรับพลวัตผกผันของแขนกล ด้วยวิธี จินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) มาใช้โดยวิธีนี้สามารถทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเสมอ โดยที่ต้องการข้อมูลเฉพาะตำแหน่งย้อนกลับ (position feedback) โดยได้ทำการทดสอบกับหุ่นยนต์แขนกล PUMA 560 (สำหรับข้อต่อที่ 2 และ 3 เท่านั้น)

Flandin และคณะ (2000) ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลร่วมกันของการติดกล้องที่ตัวหุ่นยนต์และติดตั้งกล้องภายนอกเพื่อสังเกตพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยได้เสนอแนวความคิดว่าการควบคุมหุ่นยนต์นั้นสามารถทำได้ 2 แบบคือการติดกล้องที่ตัวหุ่นยนต์ และการติดตั้งกล้องภายนอกตัวหุ่นยนต์และทำการสังเกตหุ่นยนต์ภายในพื้นที่ทำงาน ทั้งสองแบบนี้จะมีความแตกต่างกันทางด้านเทคนิคโดยที่ การติดกล้องที่ตัวหุ่นยนต์นั้นสามารถมองได้อย่างละเอียดถูกต้อง แต่มุมมองแคบ และการติดตั้งกล้องภายนอกตัวหุ่นยนต์จะมีความถูกต้องน้อยกว่าแต่สามารถมองได้มุมที่มากกว่า

Liu และคณะ (2002) ได้นำเสนอแนวความคิดใหม่เกี่ยวกับการควบคุมแบบเรียนรู้ด้วยตัวเองของ หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม โดยใช้การจับเคลื่อนเชิงภาพที่ใช้กล้องติดที่ปลายแขนกล ในบทความนี้ได้แนะนำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียม เป็นตัวแปรสำคัญในการรวมกันของส่วนประกอบของการเปลี่ยนแปลงโดยตรงจากภาพ ไปยังข้อต่อต่างๆโดยไม่ต้องทำการปรับเทียบ

Liu และคณะ (2002) ได้ใช้การจับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยอาศัยตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่ไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของเป้าหมาย โดยที่หุ่นยนต์ทำงานแบบมองแล้วเคลื่อนที่ในการค้นหาวัตถุ ในบทความนี้ได้ทำการจำลองการกระทำโดยใช้ จินเนติกอัลกอริทึม ในการทำงานแต่ละช่วงของการเคลื่อนที่ ผลของแบบจำลองที่กระทำกับ ข้อต่อแบบ 2 แกนของหุ่นยนต์แสดงว่าสามารถค้นหาวัตถุเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งได้มีการพิสูจน์ว่าสามารถทำงานในการควบคุมแบบเวลาจริงของการหยิบจับวัตถุได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ทำเพียงเฉพาะระบบที่มีความอิสระเท่ากับสองเท่านั้น

Elena และคณะ (2003) ได้ใช้ระบบกล้องสำหรับการติดตามของหุ่นยนต์ต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุในพื้นที่ทำงาน โดยอาศัยการร่วมมือกันของกล้องบนหุ่นยนต์/กล้องมองที่หุ่นยนต์เพื่อการจับเคลื่อนเชิงภาพ

Gonçalves และ Pinto (2003) ได้นำเสนอการควบคุมแบบใหม่สำหรับพลวัตการจับเคลื่อนเชิงภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยได้ทำการติดตั้งกล้องที่ปลายแขนกล

Shen และ Pan (2003) ได้อธิบายถึงการวิเคราะห์แบบจำลองสัมพรรค (affine model) ของการเคลื่อนที่ของภาพ ซึ่งพบว่าเมื่อกำลังเคลื่อนที่จะสามารถระบุตำแหน่งเป้าหมายที่สัมพันธ์กับ

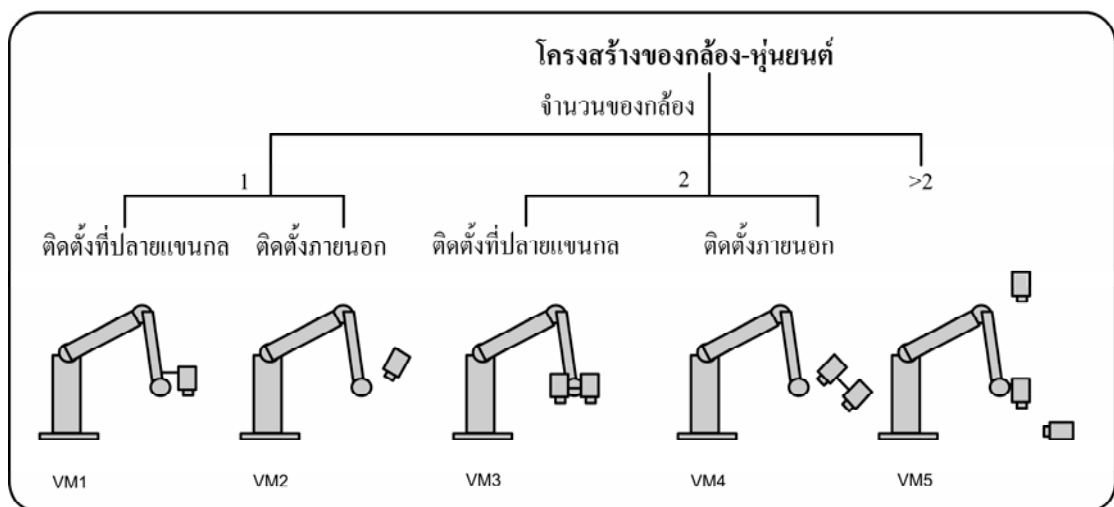


กล้องได้ชัดเจน ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ง่ายโดยใช้โมเมนต์ของภาพ (image moment) โดยเป็นการใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบง่ายที่ได้มาจากสมการสถานะ และนำไปสู่การควบคุมปรับตัวแบบง่าย ที่ซึ่งสามารถขับเคลื่อนกล้องไปยังตำแหน่งอุดมคติได้

Gonçalves และ Pinto (2003) ได้นำเสนอผลทดสอบการทดลองควบคุมการขับเคลื่อนด้วยรูปภาพโดยอาศัยภาพในการเคลื่อนที่กับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม โดยในการทดสอบนั้นได้ทดสอบกับตัวควบคุมแบบ P, PD, PI และ PID กับการใช้คุณลักษณะการมองเห็นที่มากและน้อย โดยในการทดสอบนี้ได้ทดลองกับระบบข้อต่อแบบ 2 แกนของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม

### 2.3 การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องโดยใช้วิซวลเซอร์โว

การติดตั้งกล้องเข้ากับหุ่นยนต์แขนกลเพื่อใช้ควบคุมแบบวิซวลเซอร์โวนั้นสามารถแบ่งแยกการติดตั้งได้หลายรูปแบบเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้มีการแบ่งอย่างชัดเจนทั้งในด้าน องค์ประกอบของกล้อง จำนวน และวิธีในการประมวลผลภาพ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของการติดตั้งกล้องร่วมกับแขนกลที่ใช้ในวิซวลเซอร์โว (จากซ้ายไปขวา) VM1 เป็นการติดตั้งกล้องตัวเดียวที่ปลายแขนกล VM2 เป็นการติดตั้งกล้องตัวเดียวภายนอกแขนกล VM3เป็นการติดตั้งกล้องสเตอริโอที่ปลายแขนกล VM4 เป็นการติดตั้งกล้องสเตอริโอภายนอกแขนกล และ VM5 เป็นการติดตั้งกล้องมากกว่าสองตัวทั้งภายในและภายนอกแขนกล

### 2.3.1 การมองเห็นแบบเดี่ยว

ระบบกล้องแบบเดี่ยวนั้นใช้กล้องที่ติดตั้งปลายแขนกล หรือติดตั้งภายนอกแขนกล ซึ่งระบบกล้องเดี่ยวจะใช้เวลาในการประมวลผลที่ใช้ข้อมูลของพารามิเตอร์รูปภาพเร็วที่สุด แต่ก็ไม่สามารถที่จะหาความลึกของเป้าหมายได้ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบที่ไม่ต้องการรู้เข้าหาเป้าหมาย ต้องการเพียงแค่อ้างดูเป้าหมายเท่านั้น

#### การติดตั้งกล้องตัวเดียวที่ปลายแขนกล

ระบบนี้จะมีการติดตั้งกล้องตัวเดียวที่ปลายแขนกลแบบคงที่เพื่อทำหน้าที่ซึ่งมองเป้าหมายที่ต้องการ มีงานวิจัยจำนวนมากได้กล่าวไว้ว่าระบบลักษณะนี้สามารถแก้ปัญหาของการมองเห็นโดยอาศัยภาพได้โดยง่าย และยังมีความแม่นยำในการติดตามเป็นพิเศษ

#### การติดตั้งกล้องตัวเดียวภายนอกแขนกล

การติดตั้งกล้องในลักษณะนี้จะเป็นประเภทที่สามารถมองเห็นภาพโดยรวมของแขนกลได้ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวิซวลเซอร์โวในยุคเริ่มแรก การใช้งานของรูปแบบนี้อาจจะนำไปชดเชยตำแหน่งของเป้าหมายที่สัมพันธ์กับกล้องหรือแขนกล ในการประมาณค่าตำแหน่งของแขนกลและเป้าหมาย ซึ่งทำให้สามารถรู้เข้าจับเป้าหมายได้ แต่ถ้าเป้าหมายเคลื่อนที่ ระบบจะต้องการความแม่นยำของกล้องซึ่งจะต้องมาจากการปรับเทียบ

### 2.3.2 การมองเห็นแบบกล้องคู่

การมองเห็นในลักษณะนี้จะเป็นการมองเห็นแบบสเตอริโอ ซึ่งเหมาะสำหรับการทำงานในปริภูมิสามมิติ จึงสามารถที่จะประมาณค่าความลึกได้อย่างถูกต้อง แต่เดิมนั้นปัญหาของการประมาณที่ไม่ถูกต้องนั้นมาจาก ข้อมูลคุณลักษณะที่เหมือนกันของภาพสองภาพหรือมากกว่า

#### การติดตั้งกล้องสเตอริโอที่ปลายแขนกล

โครงสร้างของการติดตั้งกล้องในลักษณะนี้จะใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมขับเคลื่อนของหุ่นยนต์เป็นหลัก ซึ่งวิธีนี้จะเป็วิธีที่ง่ายต่อการประมาณค่าความลึกในระนาบสามมิติ ในการเริ่มต้น โครงสร้างนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อเข้าสู่เป้าหมาย

#### การติดตั้งกล้องสเตอริโอภายนอกแขนกล

โครงสร้างในรูปแบบนี้โดยทั่วไปแล้ว จะเป็นวิธีที่ง่ายและแม่นยำที่สุดในการประมาณค่าความลึกในระนาบสามมิติ วิธีการนี้สามารถที่จะดูมุมมองได้กว้างมาก ซึ่งทำให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแขนกลและเป้าหมายพร้อมๆกัน เหมาะสำหรับระบบที่มีพื้นที่ทำงานกว้าง เนื่องจากจะสามารถเห็นภาพโดยรวมของระบบได้อย่างชัดเจน

### 2.3.3 การมองเห็นแบบใช้กล้องหลายตัว

ในการใช้กล้องหลายตัวนั้น จะต้องทำการรวมข้อมูลตามลักษณะของโครงสร้างแบบกล้องเดี่ยวและกล้องสเตอริโอ อย่างไรก็ตามการประมวลผลโดยใช้ภาพจากกล้องหลายตัวนั้นไม่เป็นที่นิยมเนื่องมาจากต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก และสิ้นเปลืองทรัพยากร

## 2.4 สรุป

การควบคุมขับเคลื่อนแบบวิหวลเซอร์โวนั้น ได้มีการแบ่งประเภทของการควบคุมหลายแบบตามลักษณะของการทำงานของหุ่นยนต์ องค์ประกอบของกล้อง จำนวน และวิธีการประมวลผลภาพ โดยแต่ละแบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ในการใช้งานระบบวิหวลเซอร์โวจึงจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงระบบที่ใช้เป็นอย่างดีเพื่อที่จะสามารถนำการควบคุมในแบบต่าง ๆ นั้นไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์แขนกล โดยใช้โครงสร้างของการติดตั้งกล้องสเตอริโอที่ปลายแขนกล เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการประมวลผลในปริภูมิสามมิติ และในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำงานพื้นที่ทำงานกว้างจึงไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างของการติดตั้งกล้องสเตอริโอภายนอกแขนกล เพราะจะทำให้ระบบไม่มีความยืดหยุ่น หรือไม่สามารถย้ายสถานที่ทำงานได้ ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างของการติดตั้งกล้อง สเตอริโอที่ปลายแขนกลที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า และสามารถประมวลค่าของเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้ง่ายกว่า

## บทที่ 3

### การควบคุมขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบวิหวลเซอร์โว

#### 3.1 บทนำ

การขับเคลื่อนเชิงภาพ (visual servo) เป็นการรวมกันของศาสตร์หลายๆแขนง ซึ่งประกอบไปด้วย การประมวลผลภาพความเร็วสูง (high-speed image processing) จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ (kinematics) พลวัตการเคลื่อนที่ (dynamic) ทฤษฎีการควบคุม (control theory) และการคำนวณโดยใช้เวลาจริง (real-time computing) ในบางงานวิจัยได้แสดงถึงการร่วมกันของ การมองเห็นแบบไวงาน (active vision) และ โครงสร้างจากการเคลื่อนที่ (structure from motion) แต่ในความเป็นจริงเรามักจะอธิบายการใช้การมองเห็นในการแบ่งระดับงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์

ในบทนี้ จะนำเสนอวิธีการควบคุมหุ่นยนต์โดยอาศัยการมองเห็นจากกล้อง ซึ่งจะใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุ แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้จากกล้องนี้ไปแปลงเป็นตำแหน่งของวัตถุเพื่อใช้ในการควบคุมขับเคลื่อนแขนกล กล้องจะทำการติดตั้งไว้ที่ส่วนปลายของแขนกลจำนวนสองตัว และทำการบันทึกภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองในตำแหน่งที่สัมพันธ์กับปลายแขนกล ความผิดพลาดก็จะเป็นค่าสัมพันธ์กับปลายแขนกล ซึ่งเนื่องจากติดตั้งกล้องจำนวนสองตัว จะทำให้ทราบถึงระยะห่างจากกล้องที่สัมพันธ์กับวัตถุเป้าหมายด้วย และได้ทำการวิเคราะห์การควบคุมโดยได้ทำการทดสอบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง

#### 3.2 วิธีในการควบคุมแขนกลด้วยระบบวิหวลเซอร์โว

การควบคุมแขนกลด้วยระบบวิหวลเซอร์โวนั้น คือการควบคุมโดยอาศัยการป้อนกลับด้วยภาพเป็นหลัก ซึ่งมีความสะดวกและมีข้อดีหลายๆอย่างเมื่อเทียบกับการควบคุมโดยอาศัยการป้อนกลับประเภทอื่น เนื่องจากการควบคุมประเภทนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานหลากหลายประเภท อาทิเช่น นำไปใช้กับงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของแขนกลในอุตสาหกรรม การตรวจหาจุดผิดพลาดในการเชื่อมต่อชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ตรวจรู้ชนิดอื่นไม่สามารถกระทำได้ การศึกษาเรื่องการควบคุมแขนกลด้วยระบบวิหวลเซอร์โวนั้น ได้มีการศึกษาและวิจัยถึงการนำไปใช้งานจริงในหลายรูปแบบ ในที่นี้จะเป็นการอธิบายคร่าวๆ ถึงการศึกษาการควบคุมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อคือ การใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม การนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกล และลักษณะการเฝ้าวัตถุ

### 3.2.1 การใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม

การขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพนั้น จะมีการติดตั้งกล้องที่ปลายแขนกล (robot end-effectors) และบันทึกภาพในตำแหน่งดังกล่าว เพื่อหาความผิดพลาดสัมพันธ์ที่ตำแหน่งปลายแขนกลที่ได้จากกล้อง ซึ่งการควบคุมแขนกลด้วยกล้องนี้มีวิธีการอยู่หลายวิธี ถ้าแบ่งประเภทตามลักษณะในการใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ การควบคุมโดยอาศัยตำแหน่ง (position based) และการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (image based) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การควบคุมโดยใช้ตำแหน่ง: การควบคุมแบบนี้จะนำภาพที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของวัตถุ เมื่อทราบตำแหน่งของวัตถุหรือหาแกนอ้างอิงของวัตถุเทียบกับกล้องได้ ก็จะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์เพื่อเข้าไปกระทำกรกับวัตถุนั้นได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบควบคุมแบบนี้จะแปลงข้อมูลที่ได้จากกล้องเป็นตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงที่กำหนดขึ้น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์

การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ: การควบคุมนี้จะไม่มีการแปลงข้อมูลในรูปภาพให้เป็นตำแหน่งของวัตถุ แต่จะทำการใช้พารามิเตอร์รูปภาพที่ได้ในการควบคุมหุ่นยนต์โดยตรง จุดเด่นของวิธีการนี้คือไม่จำเป็นต้องหาสมการทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ในการแปลงข้อมูลรูปภาพไปเป็นข้อมูลตำแหน่ง ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์นี้โดยทั่วไปแล้วจะมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์และกล้องมากมาย แต่วิธีการนี้ก็มีข้อเสียคือสามารถเข้าใจได้ยากและอาจทำให้ระบบควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้น

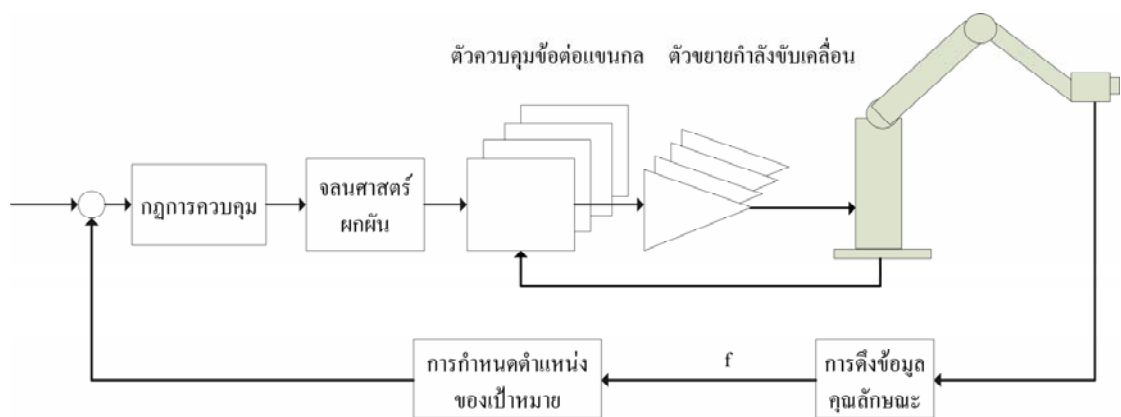
### 3.2.2 การนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกล

การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะในการนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อต่างๆของแขนกลเป็น 2 วิธีคือ การควบคุมแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต (dynamic look and move) และการขับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง (direct visual servo) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

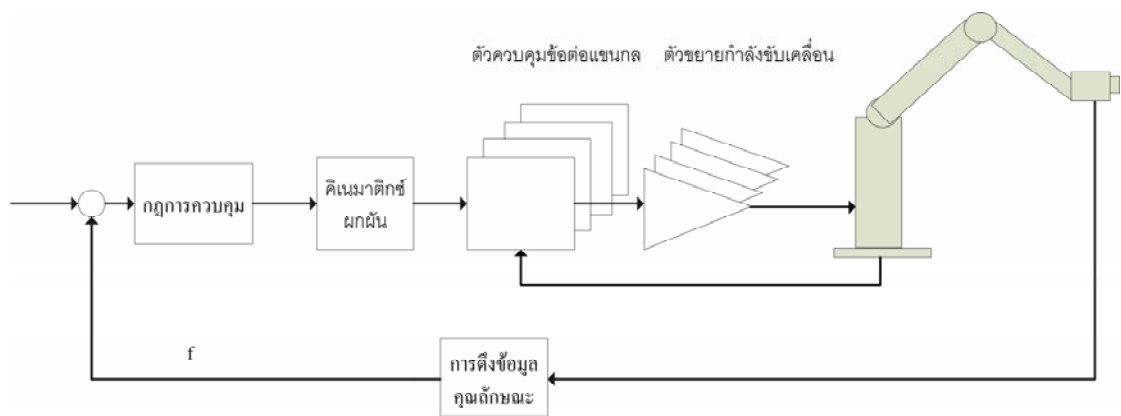
การควบคุมแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต: การควบคุมแบบนี้ กล้องจะทำการประมวลผลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่งหรือพารามิเตอร์ของวัตถุเป้าหมาย จากนั้นจึงส่งข้อมูลให้กับตัวควบคุมของข้อต่อ ตัวควบคุมของข้อต่อก็จะทำการควบคุมให้แขนกลทำงานเพื่อให้บรรลุตามเป้าหมาย ซึ่งได้มีการทำซ้ำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำมากขึ้น การทำงานในลักษณะนี้ก็มีข้อดีคือ ระบบจะมีความแม่นยำสูงเนื่องมาจากการทำงานซ้ำเดิมอย่างต่อเนื่อง แต่ก็มีข้อเสียคือ จะต้องสูญเสียเวลาในการประมวลผลนานเนื่องจากระบบจะต้องมีการคำนวณสองส่วน

คือ ส่วนการประมวลผลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่ง และส่วนการควบคุมให้แขนกลทำงานตามเป้าหมาย

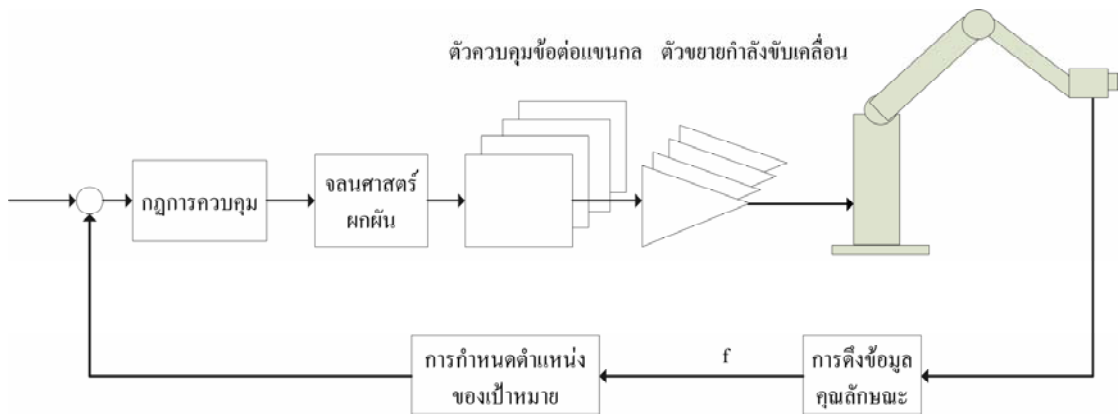
การขับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง: การควบคุมนี้ ข้อมูลสัญญาณภาพที่ได้จากกล้อง จะถูกนำไปใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อของแขนกลโดยตรง หรืออาจกล่าวได้ว่า ในการควบคุมลักษณะนี้ จะมีการคำนวณเพียงส่วนเดียว โดยกล้องจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของข้อต่อของแขนกลโดยตรง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้ก็มีข้อดีคือ ช่วยลดเวลาในการประมวลผลของการควบคุมแขนกล



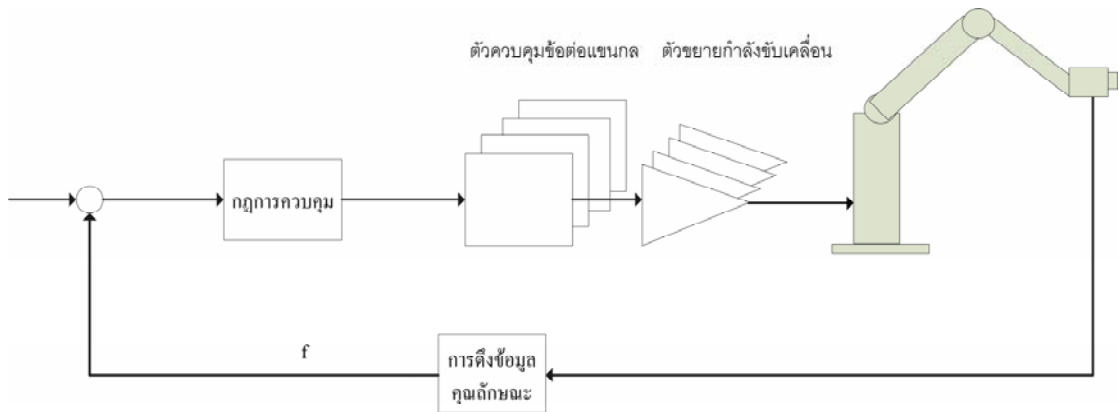
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพแบบมองแล้วเคลื่อนที่แบบพลวัต



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งแบบขับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพแบบขับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง

### 3.2.3 ลักษณะการเฝ้าวัตถุ

การควบคุมโดยอาศัยภาพจากกล้องนี้ สามารถแบ่งตามลักษณะการเฝ้าวัตถุเป้าหมายได้เป็น 2 แบบคือ การเฝ้าแบบเปิด (endpoint open-loop: EOL) และการเฝ้าแบบปิด (endpoint close-loop: ECL) โดยมีรายละเอียดดังนี้

การเฝ้าแบบเปิด: กล้องในลักษณะนี้จะเฝ้าเฉพาะวัตถุเป้าหมายเท่านั้น โดยจะต้องทราบตำแหน่งของปลายแขนกลสัมพันธ์กับตัวกล้องล่วงหน้า

การเฝ้าแบบปิด: กล้องในลักษณะนี้จะเฝ้าทั้งวัตถุเป้าหมายและปลายแขนกลทำให้ทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะเวลาที่จับภาพ โดยไม่ต้องทราบตำแหน่งของปลายแขนกลสัมพันธ์กับตัวกล้องล่วงหน้า

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยรูปภาพโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (image based visual servoing) ซึ่งจะใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุ แล้วจึงนำข้อมูลตำแหน่งที่ได้นี้ไปใช้ในการควบคุมแขนกล

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบใช้พารามิเตอร์รูปภาพ ควบคุมแบบการขับเคลื่อนที่อาศัยภาพโดยตรง และการเฝ้าดูเป็นแบบปิด กล่าวคือมีเฉพาะกล้องที่ติดตั้งอยู่บนแขนกลเท่านั้น โดยจะมีการติดตั้งกล้องที่ปลายแขนกล (robot end effector) จำนวน 2 ตัว

### 3.3 ทฤษฎีการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ

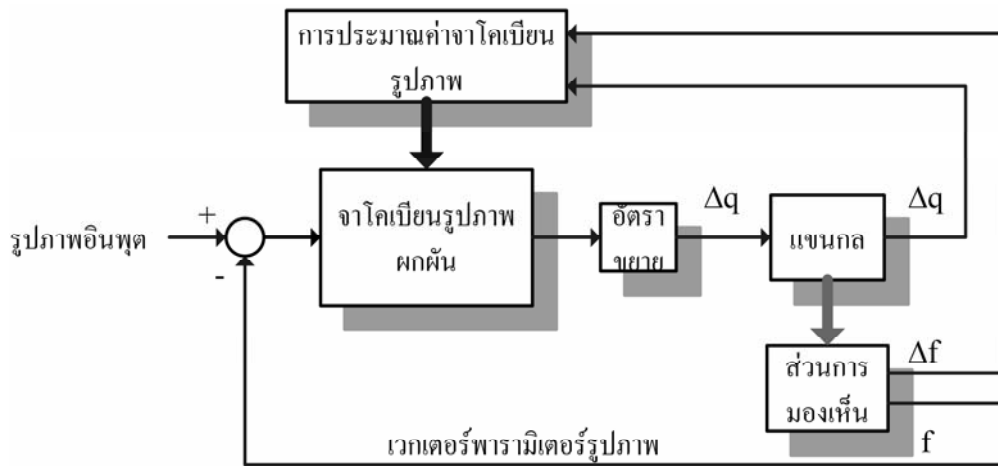
การควบคุมแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวหรือการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยภาพนั้น ระบบจะสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแขนกลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์นี้ในการควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมาย เมตริกซ์ที่เก็บความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแขนกลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จะเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ (image Jacobian) และค่าพารามิเตอร์รูปภาพอาจเป็นค่าพารามิเตอร์ในการวัดใดๆ ก็ได้ในรูปภาพ เช่น ตำแหน่ง ขนาด ระยะทาง หรือพื้นที่ของวัตถุในรูปภาพ

ถ้าทำการปรับเทียบแขนกลและตำแหน่งของกล้องอย่างสมบูรณ์ก็จะทำให้สามารถหาจาโคเบียนรูปภาพที่ตำแหน่งใดๆ ของแขนกลได้ อย่างไรก็ตามการปรับเทียบนั้นโดยทั่วไปแล้วมักมีความยุ่งยากและมักมีความผิดพลาดเกิดขึ้น แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการเลือกใช้เทคนิคการควบคุมโดยไม่ต้องทำการปรับเทียบ จากบทความ (Weiss, et.al., 1987) ระบุว่าสามารถประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพได้โดยไม่ต้องทำการปรับเทียบ ถ้าเลือกชุดพารามิเตอร์รูปภาพที่ถูกต้อง ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดในการประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพและการนำมาใช้ในการควบคุมแขนกลตามหลักการของวิซวลเซอร์โว

#### 3.3.1 จาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobian)

การควบคุมหุ่นยนต์สามารถนิยามได้ในทอมของพารามิเตอร์ของจุดตำแหน่งปลายสุดของหุ่นยนต์แขนกลในปริภูมิอ้างอิงคาร์ทีเซียน ซึ่งจะเรียกการแปลงนี้ว่าจาโคเบียนของหุ่นยนต์ (robot Jacobian) และการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลนี้จะทำให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเรียกการแปลงนี้ว่า จาโคเบียนรูปภาพ (image Jacobian) โดยที่จาโคเบียนของหุ่นยนต์สามารถที่จะหาที่มาได้ดังแสดงใน (Craig, 1989) และ จาโคเบียนรูปภาพ สามารถที่จะหาที่มาได้โดยการนำเอาแบบจำลองฉายภาพ (projection model) เข้าไปรวมกับจาโคเบียนของหุ่นยนต์ (Corke, et.al., 1996)





รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันการทำงานควบคุมแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ

พิจารณาระบบหุ่นยนต์แขนกลดังรายละเอียดต่อไปนี้

- แขนกลมี  $n$  ข้อต่อ และมีความอิสระจากกัน (DOF) เท่ากับ  $n$
- ตัวกล้องยึดติดอยู่ที่ปลายแขนกล
- พารามิเตอร์รูปภาพมีจำนวน  $m$  ตัว
- เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของข้อต่อ  $\theta$  มีขนาด  $n$
- เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของปลายแขนกลเทียบกับแกนอ้างอิงคาร์ทีเซียน  $\vec{r}$  มีขนาด  $p$
- เวกเตอร์ที่แสดงค่าพารามิเตอร์รูปภาพ  $\vec{f}$  มีขนาด  $m$

เราจะได้ความสัมพันธ์ของความเร็วข้อต่อแขนกล  $\dot{\theta}$  กับเวกเตอร์ของความเร็วปลายแขนกล  $\dot{r}$  จะอยู่ในเทอมของจาโคเบียนของแขนกล  $J$  (Robot Jacobian) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\dot{r} = J \cdot \dot{\theta} \quad (3.1)$$

โดยที่

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial r_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial r_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_m}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_m}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial r_m}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของปลายแขนกล จะส่งผลให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปด้วย และจะสามารถใช้การคำนวณภาพฉายแบบทัศนมิติเพื่อหาความสัมพันธ์นี้ได้จากความสัมพันธ์นี้จะทำให้ค่าอนุพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เทียบกับเวลา  $\dot{f}$  สัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขนกล  $\dot{r}$  ดังสมการ

$$\dot{f} = J_r \cdot \dot{r} \quad (3.3)$$

โดยที่  $J_r$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $m \times p$  ที่ตำแหน่งของแขนกล  $\theta$

$$J_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial r_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \frac{\partial f_m}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial r_n} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ  $\dot{f}$  กับความเร็วข้อต่อแขนกล  $\dot{\theta}$  ในเทอมของ จาโคเบียนผสม ซึ่งเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ ได้ดังสมการ

$$\dot{f} = J_\theta \cdot \dot{\theta} \quad (3.5)$$

โดยที่  $J_\theta = J_r \cdot J$  ดังนั้นจะได้

$$J_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

### 3.3.2 การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพพลวัต (Dynamic Estimation of Image

#### Jacobian)

จาโคเบียนรูปภาพ สามารถที่จะประมาณแบบพลวัตได้บนพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อต่างๆ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จากความสัมพันธ์  $\dot{f} = J_q \cdot \dot{\theta}$  ซึ่งความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ  $\dot{f}$  จะสัมพันธ์กับความเร็วข้อต่อแกนกล  $\dot{\theta}$  แบบเชิงเส้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ เทียบกับความเร็วข้อต่อแกนกล ดังนี้

$$\Delta\theta = J_{\theta}^{-1}\Delta f \quad (3.7)$$

โดยที่  $\Delta\theta = \theta^i - \theta^{i-1}$  คือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแกนกลของรอบการคำนวณที่  $i-1$  และ  $i$   $\Delta f = f^i - f^{i-1}$  คือการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพของรอบการคำนวณที่  $i-1$  และ  $i$  พิจารณาตำแหน่งเวลาที่  $i$  ซึ่งในขณะเวลาดังกล่าว ระบบสามารถสมมุติได้ว่ามีค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพเท่ากับ  $f^i$  และในขณะนั้นเวกเตอร์ของข้อต่อคือ  $\theta^i$  ดังนั้นระบบสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพได้เท่ากับ  $df = f^i - f^{i-1}$  และการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ข้อต่อเท่ากับ  $d\theta = \theta^i - \theta^{i-1}$  ซึ่งจะนำมาประมาณหาค่าจาโคเบียนรูปภาพ

เพื่อที่จะสามารถควบคุมข้อต่อได้ ขนาดของเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของเวกเตอร์ข้อต่อ ( $n \leq m$ ) เพื่อที่จะประมาณหาค่าของจาโคเบียนรูปภาพ ต้องใช้การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์รูปภาพและการเปลี่ยนแปลงข้อต่อทั้งหมด  $n$  คู่  $[(d\theta^{i-n+1}, df^{i-n+1}), \dots, (d\theta^i, df^i)]$  และสามารถสร้างเมตริกซ์  $DQ$  และ  $DF$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} DQ &= \begin{bmatrix} d\theta^{i-n+1} & \dots & d\theta^i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} d\theta_1^{i-n+1} & \dots & d\theta_1^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d\theta_n^{i-n+1} & \dots & d\theta_n^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
DF &= \begin{bmatrix} df^{i-n+1} & \dots & df^i \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} df_1^{i-n+1} & \dots & df_1^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ df_m^{i-n+1} & \dots & df_m^i \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

โดยที่  $d\theta^i = [d\theta_1^i, \dots, d\theta_n^i]^T$  และ  $df^i = [df_1^i, \dots, df_m^i]^T$  ซึ่งจะเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด  $n$  และ  $m$  ตามลำดับ ดังนั้น  $DQ$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $n \times n$  และ  $DF$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $m \times n$  และสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพได้โดย

$$\hat{J}_\theta = DF \cdot DQ^{-1} \tag{3.10}$$

ค่าจาโคเบียนที่ประมาณได้นี้ จะทำให้สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงข้อต่อแขนกล  $\Delta\theta$  ที่ทำให้ความผิดพลาดมีขนาดเล็กลงเมื่อแขนกลเคลื่อนที่ไปในทิศทางดังกล่าวระบบก็จะทำการสังเกตและเก็บค่า  $\Delta f^{i+1}$  และ  $\Delta\theta^{i+1}$  ซึ่งค่าที่ได้ใหม่นี้จะถูกนำไปสร้างเป็น  $DQ$  และ  $DF$  คู่ใหม่ วิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาค่า  $DQ$  และ  $DF$  ทำได้โดยการเปลี่ยน  $\Delta\theta^{i-n+1}$  และ  $\Delta f^{i-n+1}$  ด้วย  $\Delta\theta^{i+1}$  และ  $\Delta f^{i+1}$  ชุดใหม่

### 3.3.3 การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพในจุดเริ่มต้น

ในการหาค่าจาโคเบียนในตำแหน่งเริ่มต้นนั้น สามารถหาค่า  $DQ$  และ  $DF$  ได้ 2 วิธี โดยในวิธีแรกนั้นเริ่มจากการเริ่มเคลื่อนข้อต่อแขนกลแบบสุ่มในตำแหน่งเริ่มต้นจนกระทั่งมีข้อมูลเพียงพอ หรืออีกวิธีหนึ่งก็คือทำการเคลื่อนที่ทีละหนึ่งข้อต่อและทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว จะนิยมใช้แบบหลัง เนื่องจากวิธีการนี้จะเป็นขั้นตอนมากกว่าและสามารถรับประกันได้ว่าสามารถหา  $DQ$  และ  $DF$  ได้

### 3.3.4 ทิศทางในการปรับตำแหน่งของข้อต่อแขนกล

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถใช้อินพุตที่ได้จากจาโคเบียนรูปภาพ  $J_\theta$  และค่าความผิดพลาด  $\Delta f$  ที่ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล  $\theta$  ปัจจุบันเพื่อคำนวณหาทิศทางในการปรับตำแหน่งข้อต่อแขนกล  $\Delta\theta$  เพื่อให้มีค่าความผิดพลาดลดลง ซึ่งค่า  $\Delta\theta$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta\theta = k \cdot \hat{J}_\theta^{-1} \Delta f \tag{3.11}$$

โดยที่  $k$  คือช่วงก้าวเดิน (step size) และ  $0 < k < 1$

### 3.3.5 การเลือกขนาดของการก้าวเดิน

ขนาดของการก้าวเดินนี้มีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพของระบบ เนื่องจากถ้าเลือกขนาดของการก้าวเดินเล็ก ก็จะช่วยทำให้ระบบมีเสถียรภาพมาก แต่ก็ส่งผลให้การเคลื่อนที่ข้อต่อของแขนกลเพื่อให้บรรลุตามจุดมุ่งหมายเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อเลือกขนาดของการก้าวเดินมากขึ้น ก็จะทำให้ระบบเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้รวดเร็วขึ้น แต่ก็ทำให้เสถียรภาพลดลงอย่างไรก็ตามขนาดของการก้าวเดินไม่ควรเกิน 1 ทั้งนี้เนื่องจากถ้าจาโคเบียนรูปภาพมีค่าคงที่แล้ว ขนาดของการก้าวเดินที่มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายภายในก้าวเดินเดียว ขนาดของการก้าวเดินที่มากกว่านี้จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามจาโคเบียนรูปภาพมักมีค่าไม่คงที่ และเป็นการประมาณ ดังนั้น ขนาดของการก้าวเดินไม่ควรมีค่ามากเกินไปนัก ในการศึกษานี้ได้ใช้ขนาดของการก้าวเดินแบบคงที่ และได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดของการก้าวเดิน

### 3.3.6 เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม

เนื่องจากเมตริกซ์จาโคเบียน เป็นเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเร็วในปริภูมิคาร์ทีเซียน (cartesian space) กับค่าความเร็วในปริภูมิข้อต่อหุ่นยนต์ (joint space) โดยปกติแล้วในการใช้งานจริงจะเป็นเมตริกซ์ที่ไม่จัตุรัส เราจึงใช้วิธีเมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม (pseudo inverse jacobian matrix) ในการหาค่าความเร็วเชิงมุมในแต่ละข้อต่อ และได้ใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบกำลังสองน้อยสุด (least-square method) ทำการแก้ไขค่าความผิดพลาดของความเร็วในปริภูมิที่เกิดจากการคำนวณโดยใช้วิธีจาโคเบียนผกผันเทียม จึงทำให้หุ่นยนต์แขนกล มีความแม่นยำในการลู่อเข้าหาเป้าหมายเช่นเดียวกับการใช้เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันแบบเดิม

การประยุกต์การควบคุมขับเคลื่อนแขนกลโดยอาศัยภาพชนิดต่างๆ ต้องการการคำนวณ  $\dot{\theta}$  ซึ่งคือค่าอนุพันธ์ที่แสดงตำแหน่งของปลายแขนกลเทียบกับแกนอ้างอิงคาร์ทีเซียน ถ้ากำหนดให้  $f$  คือค่าอนุพันธ์ของค่าพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับเวลา ในที่นี้เราสนใจการค้นหา  $\dot{\theta}$  สมมุติให้  $f$  มีค่าใดๆ เมื่อ  $n$  คือจำนวนของข้อต่อ และ  $m$  คือจำนวนของพารามิเตอร์รูปภาพ เราจะได้ว่ามีกรณีที่ต้องทำการพิจารณา 3 กรณีคือ  $n = m, n < m$  และ  $n > m$

กรณีแรก เมื่อ  $n = m$  และ  $J$  คือเมตริกซ์ที่สามารถหาเมตริกซ์ผกผัน  $J^{-1}$  ได้ ดังนั้นในกรณีนี้

$$d\theta = J^{-1} \cdot df \quad (3.12)$$

กรณีที่สอง เมื่อ  $n \neq m$  เราไม่สามารถหาค่า  $J^{-1}$  ได้โดยตรง ในกรณีนี้เราจะสามารถคำนวณผลเฉลยของสมการแบบกำลังสองน้อยสุดที่ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแสดงได้ดังสมการ

$$d\theta = J_\theta^+ \cdot df + (I - J_\theta^+ J_\theta) b \quad (3.13)$$

เมื่อ  $J_\theta^+$  คือค่าเมตริกซ์ผกผันเทียมที่เหมาะสม (suitable pseudo inverse) สำหรับ  $J_\theta$  ใดๆ และ  $b$  คือเวกเตอร์ใดๆ

เราจะเริ่มทำการพิจารณาในกรณี  $n < m$  จะได้ว่ามีจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพมากกว่าจำนวนของข้อต่อที่จะทำการเคลื่อนที่ เราจะสามารถแสดงสูตรของตำแหน่ง  $[f_{n+1} \dots f_m]$  ได้ด้วยฟังก์ชันของ  $[f_1 \dots f_n]$  จากนั้นเราจะอนุมานว่า  $m - n$  มีมากพอต่อคุณลักษณะในการเคลื่อนที่ ในกรณีนี้เราจะใช้เมตริกซ์ผกผันเทียมที่เหมาะสม ซึ่งจะได้

$$J_\theta^+ = (J_\theta^T \cdot J_\theta)^{-1} \cdot J_\theta^T \quad (3.14)$$

เมื่อ  $n > m$  ระบบจะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดบางประการ ในการประยุกต์การขับเคลื่อนเชิงภาพนั้นมีความหมายว่าเราไม่สามารถสังเกตด้วยจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพที่มากเพียงพอต่อการกำหนดลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $\theta$  ในกรณีนี้ เราจะใช้เมตริกซ์ผกผันเทียมที่เหมาะสมซึ่งจะได้ว่า

$$J_\theta^+ = J_\theta^T \cdot (J_\theta \cdot J_\theta^T)^{-1} \quad (3.15)$$

ในกรณีที่  $n \neq m$  นี้เราจะได้ว่า  $(I - J_\theta^+ \cdot J_\theta) = 0$  (ลำดับที่ของปริภูมิผู้ศูนย์ของ  $J_\theta$  คือ 0 เนื่องจากมิติของเมตริกซ์  $J_\theta$  คือ  $r < \min(m, n) = \text{rank}(J)$ ) เพราะฉะนั้น ผลเฉลยของสมการจะสามารถเขียนได้ว่า

$$d\theta = J_\theta^+ \cdot df \quad (3.16)$$

ในงานวิจัยนี้เราจะใช้กรณีของ  $n > m$  ซึ่งจะมีจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพน้อยกว่าจำนวนข้อต่อที่ต้องการเคลื่อนที่ เนื่องจากในการใช้งานแขนกลนั้นเราไม่อาจหาพารามิเตอร์รูปภาพ

ให้ได้เท่ากับจำนวนข้อต่อที่ต้องการเคลื่อนที่ เพราะข้อต่อของแขนกลนั้น โดยทั่วไปแล้วจะมีถึง 6 ข้อต่อหรือมากกว่า ซึ่งเป็นการยากมากถ้าจะหาพารามิเตอร์รูปภาพที่มากขนาดนั้น

### 3.4 การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต

การควบคุมแขนกลโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพในงานวิจัยนี้ ได้มีการพัฒนาการใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอขึ้นเพื่อให้สามารถแยกการทำงานระหว่างกล้องแต่ละตัวได้อย่างอิสระต่อกัน เนื่องจากถ้านำพารามิเตอร์รูปภาพจากกล้องทั้ง 2 ตัวมารวมกันเป็นจาโคเบียนรูปภาพตัวเดียวแล้วนั้น เมื่อเกิดปัญหากับพารามิเตอร์รูปภาพจากกล้องตัวใดตัวหนึ่ง จะส่งผลให้ระบบทำงานผิดพลาด จึงได้นำการใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอมาเพื่อลดข้อผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นดังกล่าว

#### 3.4.1 ข้อจำกัดของการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต

การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัตนั้น ได้มีการพัฒนามาจากความรู้ทางด้านจาโคเบียนรูปภาพเพื่อให้สามารถที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเพื่อให้ผู้เข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง โดยที่มีการพัฒนาให้สามารถทำการประมาณค่าการเคลื่อนที่ของข้อต่อโดยอาศัยพารามิเตอร์รูปภาพ ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ของจุดตำแหน่งปลายสุดของหุ่นยนต์แขนกลในปริภูมิอ้างอิงคาร์ทีเซียนหรือเรียกว่าจาโคเบียนของหุ่นยนต์ (robot Jacobian) และการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์รูปภาพในขณะที่มีการเคลื่อนที่หรือเรียกว่าจาโคเบียนของรูปภาพ (image Jacobian) มารวมกันเพื่อที่จะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ครั้งต่อไปได้อย่างถูกต้อง แต่การกระทำนั้นมีข้อจำกัดทางด้านจำนวนของพารามิเตอร์รูปภาพที่ไม่เพียงพอต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ เนื่องจากจำนวนของพารามิเตอร์รูปภาพนั้นจะต้องมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนของข้อต่อที่จะทำการควบคุม ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการใช้เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียมเพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่ข้อจำกัดดังกล่าวก็ยังไม่หมดไป เพราะการที่จะให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายอย่างถูกต้องนั้น การเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนตั้งและแกนนอนของกล้องเพียงตัวเดียวไม่เพียงพอต่อการกำหนดตำแหน่งในปริภูมิสามมิติ จึงจำเป็นต้องมีการนำการประมวลผลด้วยกล้องแบบสเตอริโอมาเพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่งต่างๆ จึงได้มีการพัฒนาวิธีการในการควบคุมแขนกลด้วยพารามิเตอร์รูปภาพจากกล้องแบบสเตอริโอ หรือเรียกว่าการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต

#### 3.4.2 หลักการของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ

การใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัตจากกล้องเพียงตัวเดียวนั้นมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ เช่นเมื่อตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในภาพหายไป ในขณะที่ใด ๆ ก็จะทำให้การคำนวณจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัตไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ จึงได้มีการพัฒนาจาโคเบียน

รูปภาพสเตอริโอแบบพลวัตเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องนี้ โดยที่ได้ทำการคำนวณจาโคเบียนรูปภาพแยกกันระหว่างกล้องแต่ละตัวแล้วจึงนำมารวมกันเพื่อใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกล

หลักการทำงานของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอสามารถอธิบายรายละเอียดแบบคร่าวๆ เกี่ยวกับทฤษฎีของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ และการนำไปใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากจาโคเบียนรูปภาพจะหาความสัมพันธ์ของความเร็วข้อต่อแขนกล  $\dot{\theta}$  กับเวกเตอร์ของความเร็วปลายแขนกล  $J$  (robot Jacobian) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\dot{r} = J \cdot \dot{\theta} \quad (3.17)$$

และจะหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เทียบกับเวลา  $f$  สัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขนกล  $\dot{r}$  ดังสมการ

$$\dot{f} = J_r \cdot \dot{r} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.13) สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เทียบกับเวลา  $f$  สัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขนกล  $\dot{r}$  ได้ใหม่คือ

$$\dot{f}_1 = J_{r_1} \cdot \dot{r} \quad (3.19)$$

$$\dot{f}_2 = J_{r_2} \cdot \dot{r} \quad (3.20)$$

จากสมการของจาโคเบียนรูปภาพ สามารถเขียนในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพ  $f = [f_1, \dots, f_m]^T$  กับเวกเตอร์ความเร็วของปลายแขนกลในปริภูมิอ้างอิงคาร์ทีเซียน  $r = [r_1, \dots, r_p]^T$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด  $p$  ได้ใหม่คือ  $\dot{f}_1 = J_{r_1} \cdot \dot{r}$  และ  $\dot{f}_2 = J_{r_2} \cdot \dot{r}$  จากสมการทั้ง 2 สมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 สมการดังกล่าวมีความสัมพันธ์ต่อกันด้วย  $\dot{r}$  ดังนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์นี้ในการรวมกันของสมการทั้ง 2



$$\begin{bmatrix} \dot{f}_1 \\ \dot{f}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{r_1} \\ J_{r_2} \end{bmatrix} \cdot \dot{r} \quad (3.21)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์จากกล้องทั้ง 2 ตัวเทียบกับเวลา  $\dot{f}_{1,2} = \begin{bmatrix} \dot{f}_1 & \dot{f}_2 \end{bmatrix}^T$  และจาโคเบียนของความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์จากกล้องทั้ง 2 ตัวเทียบกับเวลาที่สัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขนกล  $J_{r_{1,2}} = \begin{bmatrix} J_{r_1} & J_{r_2} \end{bmatrix}^T$  นั่นคือเราจะได้ความสัมพันธ์เดิมของจาโคเบียนรูปภาพพื้นฐานและจะได้สมการของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอดังสมการ

$$J_{\theta_{1,2}} = \begin{bmatrix} J_{\theta_1} & J_{\theta_2} \end{bmatrix}^T \quad (3.22)$$

โดยที่  $J_{\theta_1} = J_{r_1} \cdot J$

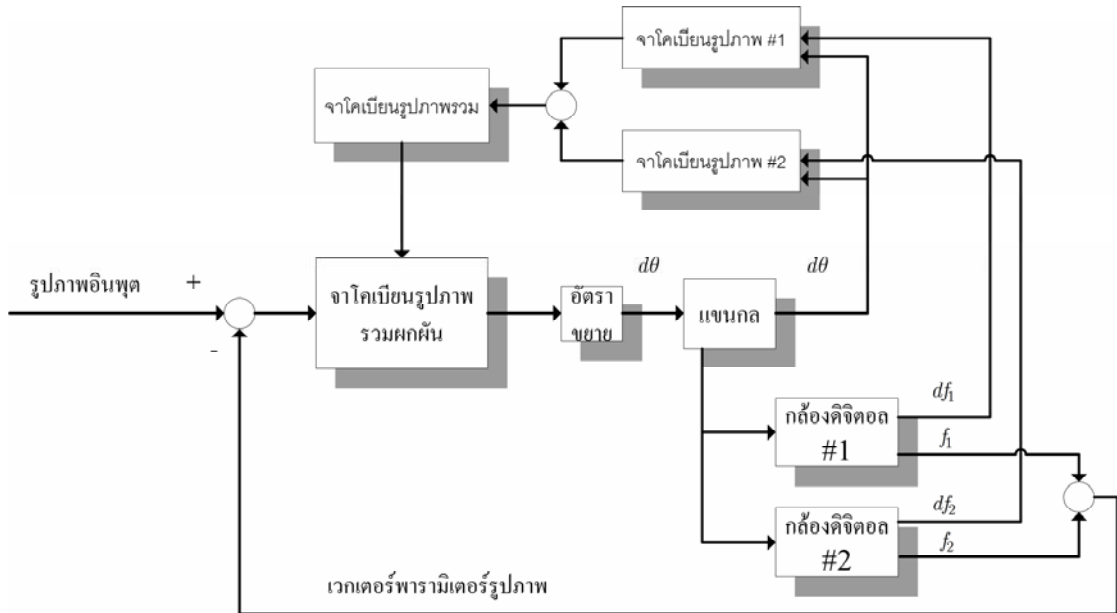
$$J_{\theta_2} = J_{r_2} \cdot J$$

$$J_{\theta_1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1_1}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_{1_1}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{1_m}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_{1_m}}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$J_{\theta_2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{2_1}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_{2_1}}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{2_m}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_{2_m}}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

นั่นคือเราสามารถนำจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอนี้ไปใช้แทนจาโคเบียนรูปภาพเดิมได้โดยอาศัยนิยามความสัมพันธ์ของการรวมกันแบบเมตริกซ์ ซึ่งทำให้การใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอไม่ผิดไปจากนิยามของการเคลื่อนที่โดยอาศัยจาโคเบียนรูปภาพแบบเดิม และสามารถที่จะทำให้แขนกลนั้นสามารถรู้เข้าหาเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยอาศัยสมการ

$$\dot{f}_{1,2} = J_{\theta_{1,2}} \cdot \dot{\theta} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ

### 3.4.3 การทำงานของการประมาณจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต

จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ สามารถที่จะประมาณแบบพลวัต ได้เช่นเดียวกับการประมาณค่าแบบพลวัตของจาโคเบียนรูปภาพ จากความสัมพันธ์  $\dot{f}_{1,2} = J_{\theta_{1,2}} \cdot \dot{\theta}$  ในสมการที่ 3.24 ซึ่งความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ  $\dot{f}$  จะสัมพันธ์กับความเร็วข้อต่อแกนกล  $\dot{\theta}$  แบบเชิงเส้น ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับความเร็วข้อต่อแกนกล ดังนี้

$$\Delta\theta = J_{\theta_{1,2}}^{-1} \Delta f_{1,2} \quad (3.26)$$

โดยที่  $\Delta\theta = \theta^i - \theta^{i-1}$  คือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแกนกลของรอบการคำนวณที่  $i-1$  และ  $i$   
 $\Delta f_{1,2} = [f_1^i - f_1^{i-1}, f_2^i - f_2^{i-1}]^T$  คือการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอของรอบการคำนวณที่  $i-1$  และ  $i$

พิจารณาค่าตำแหน่งเวลาที่  $i$  ซึ่งในขณะเวลาดังกล่าว ระบบสามารถพิจารณาได้ว่ามีค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพ เท่ากับ  $f_{1,2}^i$  และในขณะนั้นเวกเตอร์ของข้อต่อคือ  $\theta^i$  ดังนั้นระบบสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพได้เท่ากับ

$$df_{1,2}^i = [f_1^i - f_1^{i-1}, f_2^i - f_2^{i-1}]^T \quad (3.27)$$

และการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ข้อต่อเท่ากับ  $d\theta^i = \theta^i - \theta^{i-1}$  ซึ่งจะนำมาประมาณหาค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ

เพื่อที่จะสามารถควบคุมข้อต่อได้ ขนาดของเวกเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพสเตอริโอจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของเวกเตอร์ข้อต่อ ( $n \leq 2m$ ) เพื่อที่จะประมาณหาค่าของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ จำเป็นต้องใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์รูปภาพและการเปลี่ยนแปลงข้อต่อทั้งหมดขนาด  $n \times n$  คือ  $[(d\theta^{i-n+1}, df_{1,2}^{i-n+1}), \dots, (d\theta^i, df_{1,2}^i)]$  และสามารถสร้างเมตริกซ์  $DQ$  และ  $DF$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} DQ &= \begin{bmatrix} d\theta^{i-n+1} & \dots & d\theta^i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} d\theta_1^{i-n+1} & \dots & d\theta_1^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d\theta_n^{i-n+1} & \dots & d\theta_n^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} DF_1 &= \begin{bmatrix} df_1^{i-n+1} & \dots & df_1^i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} df_{1_1}^{i-n+1} & \dots & df_{1_1}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ df_{1_m}^{i-n+1} & \dots & df_{1_m}^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} DF_2 &= \begin{bmatrix} df_2^{i-n+1} & \dots & df_2^i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} df_{2_1}^{i-n+1} & \dots & df_{2_1}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ df_{2_m}^{i-n+1} & \dots & df_{2_m}^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} d\theta^i &= [d\theta_1^i, \dots, d\theta_n^i]^T \\ df_1^i &= [df_{1_1}^i, \dots, df_{1_m}^i]^T \\ df_2^i &= [df_{2_1}^i, \dots, df_{2_m}^i]^T \end{aligned}$$

ซึ่ง  $d\theta^i$ ,  $df_1^i$  และ  $df_2^i$  จะเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด  $n$ ,  $m$  และ  $m$  ตามลำดับ ดังนั้น  $DQ$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $n \times n$   $DF_1$  และ  $DF_2$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $m \times n$  และสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพได้โดยสมการ  $\hat{J}_{\theta_1} = DF_1 \cdot DQ^{-1}$  และ  $\hat{J}_{\theta_2} = DF_2 \cdot DQ^{-1}$  ดังนั้นจะได้สมการรวมคือ

$$\hat{J}_\theta = [\hat{J}_{\theta_1} \quad \hat{J}_{\theta_2}]^T \quad (3.31)$$

ค่าจาโคเบียนสเตอริโอที่ประมาณได้นี้ จะทำให้สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงข้อต่อแขนกล  $\Delta\theta$  ที่ทำให้ความผิดพลาดมีขนาดเล็กลงเมื่อแขนกลเคลื่อนที่ไปในทิศทางดังกล่าว ระบบก็จะทำการสังเกตและเก็บค่า  $\Delta f_{1,2}^{i+1}$  และ  $\Delta\theta^{i+1}$  ซึ่งค่าที่ได้ใหม่นี้จะถูกนำไปสร้างเป็น  $DQ$ ,  $DF_1$  และ  $DF_2$  ชุดใหม่ วิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาค่า  $DQ$  และ  $DF$  ทำได้โดยการแทนที่  $\Delta\theta^{i-n+1}$  และ  $\Delta f_{1,2}^{i-n+1}$  ด้วย  $\Delta\theta^{i+1}$  และ  $\Delta f_{1,2}^{i+1}$  ชุดใหม่

#### 3.4.4 การใช้งานจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอร่วมกับเมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม

การใช้งานจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้น ได้นำพารามิเตอร์รูปภาพที่มาจากตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในภาพทั้งตามแนวแกนตั้ง และแกนนอนจากกล้องทั้งสองตัวมาประมวลผลแบบจาโคเบียนสเตอริโอ แต่เนื่องมาจากการจัดวางตำแหน่งของกล้องนั้น ได้มีการวางตัวแบบขนานกัน จึงทำให้พารามิเตอร์รูปภาพตามแนวแกนนอนมีขนาดเท่ากัน จึงได้ใช้พารามิเตอร์รูปภาพจากแกนนอนเพียงแค่ตัวเดียวในขณะที่ใช้พารามิเตอร์ตามแนวแกนตั้งสองตัว นั่นก็คือจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพเทียบกับเวลาคือ

$$df_1^i = [df_{1_x}^i, df_{1_y}^i]^T \quad (3.32)$$

$$df_2^i = [df_{2_x}^i] \quad (3.33)$$

ในขณะที่ใช้แขนกลที่มีองศาอิสระเท่ากับ 4 หรือ  $n = 4$  ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแขนกล

$$d\theta^i = [d\theta_1^i, \dots, d\theta_4^i]^T \quad (3.34)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าจาโคเบียนรูปภาพจากกล้องแต่ละตัวได้โดยที่  $\hat{J}_{\theta_1} = DF_1 \cdot DQ^{-1}$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $2 \times 4$  และ  $\hat{J}_{\theta_2} = DF_2 \cdot DQ^{-1}$  จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $1 \times 4$  ซึ่งจะทำให้ได้เมตริกซ์ของจาโคเบียนสเตอริโอ  $\hat{J}_\theta = [\hat{J}_{\theta_1} \quad \hat{J}_{\theta_2}]^T$  เป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด  $3 \times 4$  จะเห็นได้ว่าขนาดของเมตริกซ์จาโคเบียนสเตอริโอ นั้นมีขนาดที่ไม่เป็นจัตุรัส จึงจำเป็นต้องใช้เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียมเข้ามาช่วยในการคำนวณ จากหลักการเมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียมในกรณี  $n > m$  จะได้ว่า  $J^+ = J^T \cdot (J \cdot J^T)^{-1}$  นำมาใช้กับเมตริกซ์ของจาโคเบียนสเตอริโอ จะได้สมการเป็น

$$\hat{J}_\theta^+ = \hat{J}_\theta^T \cdot (\hat{J}_\theta \cdot \hat{J}_\theta^T)^{-1} \quad (3.35)$$

นั่นก็คือเราจะสามารถหาการเคลื่อนที่ครั้งต่อไปของข้อต่อแขนกลได้จากสมการที่ได้มาจากการแปลงจาโคเบียนสเตอริโอที่อาศัยเมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียมคือ

$$\Delta\theta = k \cdot \hat{J}_\theta^+ \cdot \Delta f \quad (3.36)$$

ค่า  $\Delta\theta$  ที่ได้เมื่อนำไปใช้ในการสั่งข้อต่อของแขนกลให้เคลื่อนที่จะทำให้ตำแหน่งปลายสุดของแขนกลเคลื่อนที่เพื่อเข้าสู่เป้าหมายได้อย่างถูกต้อง

### 3.5 สรุป

การควบคุมขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวนั้น ได้มีการแบ่งประเภทของการควบคุมออกเป็น การใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม การนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกล และลักษณะการเฝ้าวัตถุ ซึ่งการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ คือรูปแบบหนึ่งของการควบคุมด้วยระบบวิซวลเซอร์โว โดยในงานวิจัยนี้ได้เน้นไปในการควบคุมแขนกลที่อาศัยข้อมูลจากภาพและข้อมูลการเคลื่อนที่ของข้อต่อเท่านั้น จึงได้ใช้การควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ ที่ซึ่งเป็นการพัฒนาอีกขั้นหนึ่งของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ ทำให้สามารถทำงานได้โดยมีพารามิเตอร์ที่จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 4

### องค์ประกอบของระบบ

#### 4.1 บทนำ

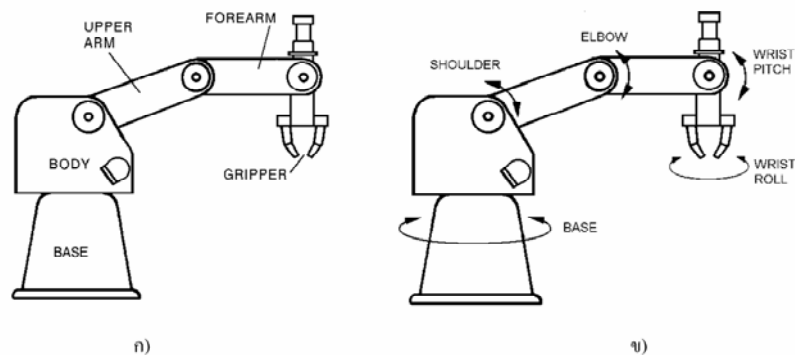
การศึกษาการควบคุมแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์ไว้นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงรายละเอียดของแขนกลที่จะนำมาควบคุม รวมถึงลักษณะในการออกคำสั่ง จึงจะสามารถที่จะทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไปได้

ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆของระบบโดยแยกเป็นส่วนประกอบต่างๆของแขนกล การติดตั้งกล้องร่วมกับแขนกล การรับ-ส่งข้อมูล การออกแบบโปรแกรม และการสร้างโปรแกรมควบคุมขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติในงานวิจัย

#### 4.2 ส่วนประกอบต่างๆของแขนกลทดสอบ

##### 4.2.1 แขนกลที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หุ่นยนต์แขนกลแบบ vertically articulated ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC โมเดล SCORBOT-ER III ซึ่งเป็นแขนกลแบบ 5 องศาอิสระและ 1 มือจับยึด เป็นตัวอย่างในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อทดสอบวิธีการควบคุมด้วยระบบวิซวลเซอร์ไวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบต่างๆของแขนกลทดสอบ ก) ชิ้นส่วนต่างๆของแขนกลทดสอบ ข) การเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆของแขนกลทดสอบ



รูปที่ 4.2 แขนกลทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4.2.2 รายละเอียดของชุดควบคุมแขนกลทดสอบ

ชุดควบคุมแขนกลนี้จะเป็นตัวควบคุมหลักทำหน้าที่ในการออกคำสั่งให้กับมอเตอร์ของข้อต่อ รับค่าจากตัวเข้ารหัสสัญญาณ (encoder) รับค่าจากอินพุตและส่งค่าไปที่เอาต์พุต ที่เป็นไมโครสวิทช์ รวมทั้งทำการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232C ซึ่งชุดควบคุมนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆคือ

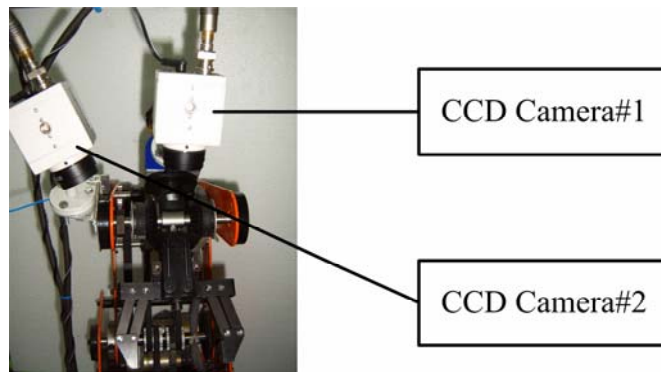
- ส่วนประมวลผลกลาง (CPU): INTEL 8031
- หน่วยความจำ: ใช้หน่วยความจำแบบ EPROM ขนาด 16K bytes
- การส่งคำสั่ง: จะส่งข้อมูลผ่าน ส่วนประมวลผลกลาง และสั่งงานมอเตอร์, ตัวเข้ารหัสสัญญาณ อินพุต และเอาต์พุต
- การรับ-ส่งข้อมูล: จะสามารถรับ และส่งข้อมูลผ่านมาตรฐาน RS-232 ( $\pm 12V$ ) และจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณระดับ TTL ในการสั่งงานส่วนประมวลผลกลางของชุดควบคุม



รูปที่ 4.3 ชุดควบคุมของแขนกลทดสอบ

### 4.3 การติดตั้งกล้องร่วมกับแขนกลทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการติดตั้งกล้องจำนวน 2 ตัวในส่วนปลายของแขนกล (end effector) เพื่อทำการรับภาพมาประมวลผล โดยกล้องทั้ง 2 ตัวนั้นได้มีการติดตั้งไว้ในตำแหน่งตรงกลางและด้านข้างของปลายแขนกลเพื่อให้ได้ภาพ 2 ภาพที่แตกต่างกันในการคำนวณหาระยะห่างระหว่างปลายแขนกลและวัตถุเป้าหมาย ซึ่งจะได้มีการอธิบายรายละเอียดของการรับภาพและประมวลผลภาพในหัวข้อต่อไป โดยการติดตั้งนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การติดตั้งกล้องแบบสเตอริโอที่ปลายแขนกล

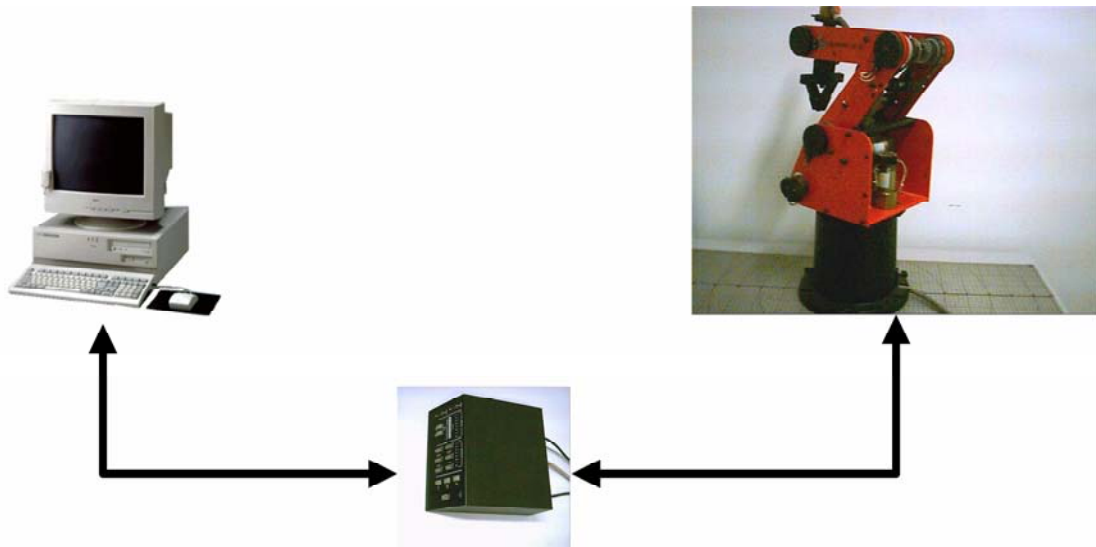
### 4.4 การรับ-ส่งข้อมูล

การรับ-ส่งข้อมูลในงานวิจัยนี้นั้นจะประกอบไปด้วย การรับ-ส่งข้อมูล 2 ชนิดคือ การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างแขนกลกับคอมพิวเตอร์ และการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ แขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีการรับ-ส่งข้อมูลผ่านตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวควบคุมแบบสำเร็จรูป จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงวิธีการทำงานและการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับตัวควบคุมเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.4.1 การส่งผ่านข้อมูลระหว่างตัวควบคุมกับคอมพิวเตอร์แบบอนุกรม

การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างแขนกลและคอมพิวเตอร์นั้น จะเป็นการรับ-ส่งจากคอมพิวเตอร์ผ่านชุดควบคุม แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ออกไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ของแขนกล ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยที่การรับ-ส่งข้อมูลนี้จะส่งผ่านพอร์ตอนุกรม และใช้อัตราบอด 9600 บิตต่อวินาที





รูปที่ 4.5 การทำงานของระบบในการรับ-ส่งข้อมูล

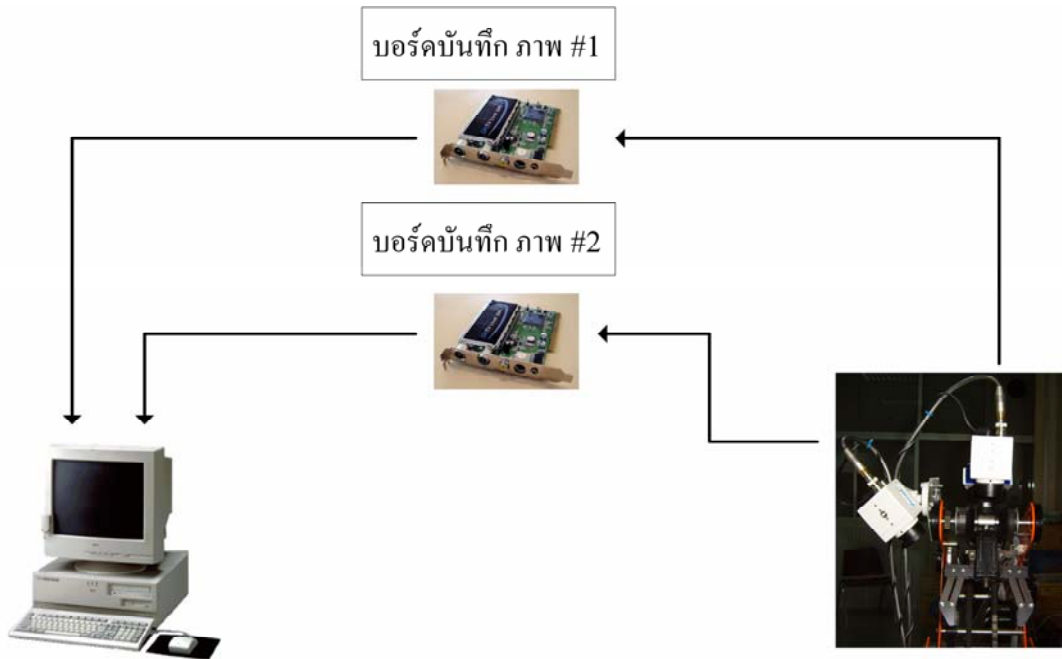
การรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และแขนกลผ่านตัวควบคุมนั้น จะประกอบไปด้วยข้อมูลหลายอย่าง ซึ่งสามารถแบ่งประเภทโดยแยกระหว่างการรับ และการส่งคือ

การรับข้อมูล จะรับเอาข้อมูลจากตัวควบคุมได้หลายอย่าง เช่นค่าคงเหลือจากการเคลื่อนที่เป็นปริมาณคงเหลือของการเคลื่อนที่ข้อต่อของแขนกล, ค่าจากตัวตรวจรู้ต่างๆ เช่นตัวเข้ารหัส (encoder) ของมอเตอร์แต่ละตัวเป็นต้น (ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ได้ อย่างถูกต้องและแม่นยำ) โดยการรับค่าคงเหลือจากการเคลื่อนที่ที่รับมาเพื่อประมวลผลหาตำแหน่งของการเคลื่อนที่ปัจจุบันเทียบกับตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อให้สามารถทราบได้ว่าแขนกลเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นเป็นมุมเท่าใดในแต่ละข้อต่อ

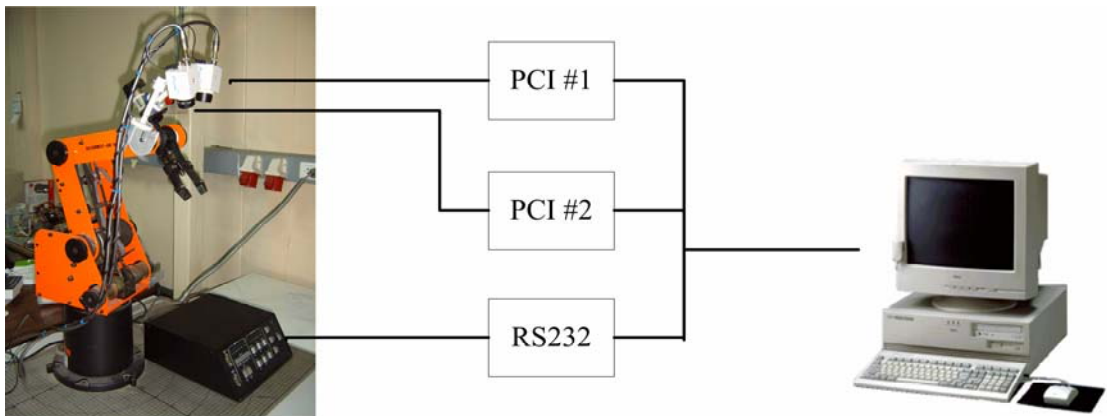
การส่งข้อมูล จะส่งข้อมูลที่ได้จากการคำนวณไปเพื่อใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกล โดยข้อมูลที่ส่งออกไปจะอยู่ในรูปขององศาการเคลื่อนที่ ซึ่งในขณะที่ส่งข้อมูล ก็จะมีการรับข้อมูลกลับมาเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบด้วย

#### 4.4.2 การรับภาพจากกล้องโดยผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อ

การเชื่อมต่อระหว่างกล้อง และคอมพิวเตอร์นั้น จะเชื่อมต่อได้โดยใช้บอร์ดบันทึกภาพ (frame grabber board) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การ์ดทีวีจูนเนอร์ (card TV tuner) และกล้องจำนวน 2 ชุด เพื่อนำข้อมูลภาพจากกล้องทั้งสองตัวมาประมวลผล โดยโปรแกรมที่ใช้ในการอ่านข้อมูลต่างๆ จากภาพนั้นจะใช้โปรแกรม Visual C++ เป็นหลัก โดยมีโปรแกรม VideoOCX เสริมเพื่อช่วยให้การนำข้อมูลภาพมาประมวลผลได้ง่ายขึ้น โดยภาพที่ได้นำมาประมวลผลจะมีขนาด  $320 \times 240$  จุดภาพ



รูปที่ 4.6 การทำงานระหว่างกล้อง อุปกรณ์เชื่อมต่อ และคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบโดยรวมของระบบ

#### 4.5 การออกแบบและสร้างโปรแกรมควบคุมแขนกลขั้นพื้นฐาน

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการสร้างโปรแกรมควบคุมแขนกลขึ้นมาใหม่ เพราะโปรแกรมการควบคุมเดิมนั้น ไม่สามารถนำมาพัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมได้ โดยในส่วนของโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาได้ทำการสร้างโดยใช้โปรแกรม Visual C++ เป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งส่วนของการออกแบบเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

#### 4.5.1 การแสดงภาพที่ได้รับมาจากกล้อง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการรับภาพจากกล้องมาเพื่อการประมวลผล โดยได้ใช้กล้องแบบสเตอริโอ ที่มีขนาด  $320 \times 240$  จุดภาพ และได้มีการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของทั้งภาพ และวัตถุเป้าหมาย โดยมีการหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางภาพและวัตถุเป้าหมายแทนด้วยเส้นผ่านจุดศูนย์กลางทั้งแนวแกนตั้ง และแนวนอน

ในการหาจุดศูนย์กลางของวัตถุเป้าหมาย (ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ลูกบอลสีเหลือง) นั้น จำเป็นต้องมีการหาสีของวัตถุเป้าหมายที่แตกต่างจากสภาพแวดล้อม ซึ่งได้มีการหาโดยใช้ความสัมพันธ์ของสีในระบบ RGB ซึ่งในระบบนี้จะเห็นได้ว่าสีของวัตถุเป้าหมายที่พบนั้นสามารถแทนได้ด้วยจุดสีขาว และสามารถที่จะนำจุดสีที่พบดังกล่าวไปประมาณหาจุดกึ่งกลางวัตถุได้



ก)



ข)

รูปที่ 4.8 ภาพที่ได้รับจากกล้องทั้งสองและการประมวลผลหาจุดศูนย์กลางภาพและวัตถุ

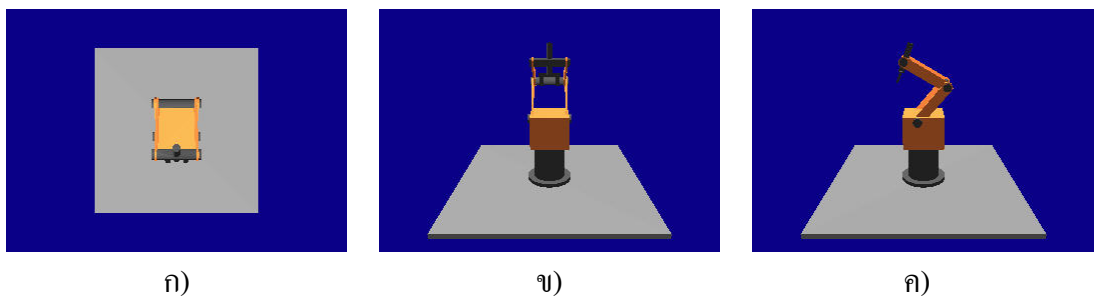
#### 4.5.2 การจำลองการทำงานของแขนกล

ในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างการจำลองการทำงานของแขนกล เพื่อที่สามารถจะสังเกตการทำงานได้ โดยได้ใช้โปรแกรม ROBOSIM version 2.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์แบบสามมิติ

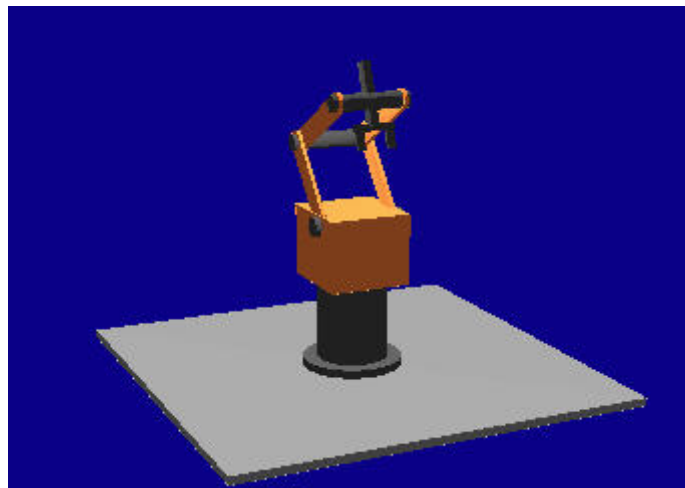
ROBOSIM เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการจำลองสถานการณ์ระบบหุ่นยนต์ ซึ่งโปรแกรมนี้เป็นการพัฒนาร่วมกันระหว่าง NASA และ Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในปัจจุบันได้พัฒนาสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ซึ่งผู้ใช้สามารถเขียนต้นรหัสได้ด้วยภาษา LISP ในการจำลองสถานการณ์ได้ ทำให้มีความสะดวกในการโต้ตอบระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้

ในเวอร์ชันล่าสุดของ ROBOSIM ได้มีการพัฒนาโมดูลในรูปแบบ ActiveX Control (เทคโนโลยี COM ของบริษัทไมโครซอฟท์) ขึ้น ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่นๆ ได้ โดยเฉพาะการนำเอามาใช้ร่วมกับโปรแกรม Visual C++ ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 4.9 แสดงการจำลองการทำงานของแขนกลในมุมมองด้านบน ด้านหน้า และด้านข้าง ที่ใช้ในงานวิจัย มุมมองแบบสามมิติแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งการจำลองนี้สามารถซูมเข้าและออกทำให้สามารถดูผลแบบละเอียดได้



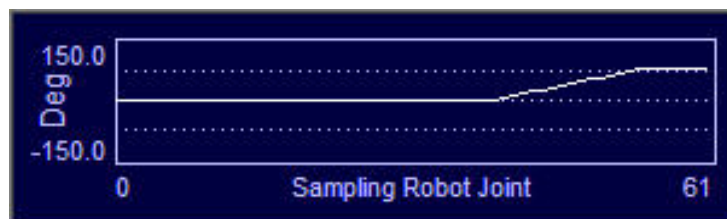
รูปที่ 4.9 การจำลองการทำงานของแขนกลในมุมมองต่างๆ ก) ด้านบน ข) ด้านหน้า และค) ด้านข้าง



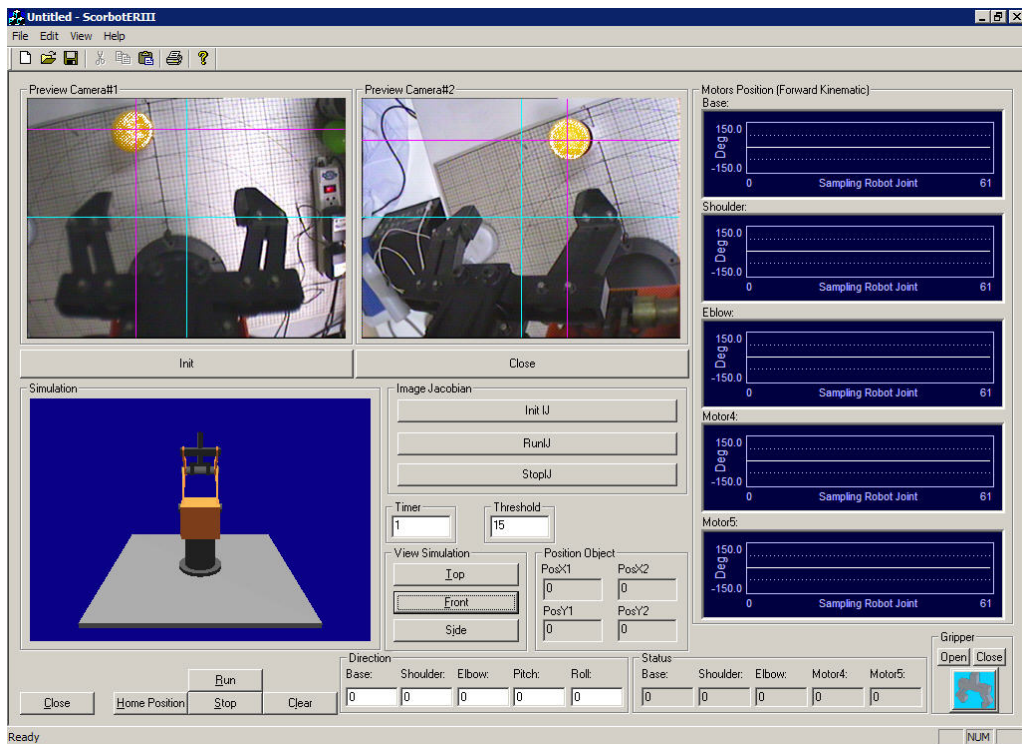
รูปที่ 4.10 การจำลองการทำงานของแขนกลแบบสามมิติ

#### 4.5.3 การแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของแขนกล

การเคลื่อนที่ของแขนกลทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ 5 ส่วนคือ ฐาน (Base) บ่า (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) และ ข้อมือ (Pitch, Roll) ซึ่งข้อมือนั้นประกอบไปด้วยมอเตอร์ 2 ตัว คือมอเตอร์ 4 และมอเตอร์ 5 เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุม ในที่นี้จึงแสดงกราฟแยกระหว่างมอเตอร์ 4 และมอเตอร์ 5 โดยในรูปที่ 4.10 จะเป็นตัวอย่างกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ ซึ่งจะมีแกนตั้งแทนจำนวนองศาการเคลื่อนที่ และแกนนอนแทนเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่



รูปที่ 4.11 กราฟองศาการเคลื่อนที่แต่ละข้อต่อของแขนกล



รูปที่ 4.12 การเชื่อมต่อกับผู้ใช้แบบกราฟิก (graphic user interface หรือ GUI) ของระบบ

#### 4.6 สรุป

การศึกษาการควบคุมแขนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงรายละเอียดของแขนกลที่จะนำมาควบคุม รวมถึงลักษณะในการออกคำสั่ง จึงจะสามารถที่จะทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไปได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาถึงลักษณะในการเคลื่อนที่ของแขนกล การรับ ส่งข้อมูลทั้งจากแขนกล กล้อง และคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงการสร้างโปรแกรมเพื่อทดสอบที่จำเป็นจะต้องสร้างเพื่อให้สามารถที่จะทดสอบวิธีการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

## บทที่ 5

### การทดสอบควบคุมแขนกลและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้ จะเป็นการทดสอบถึงการควบคุมแขนกลโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ และการควบคุมแขนกลโดยใช้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัตที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งจะใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลของตำแหน่งวัตถุเป้าหมายไปใช้ในการขับเคลื่อนแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งจะได้มีการทดสอบทั้งกรณีของการใช้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพ และการประมาณจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการทำงานของวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยในการใช้งานจริงกับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม

#### 5.2 การทดสอบควบคุมแขนกลโดยใช้การประมาณจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต

ในการทดลองนี้ ใช้การควบคุมโดยอาศัยการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบพลวัต กับหุ่นยนต์แขนกลทดสอบ SCORBOT®-ER III ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC ซึ่งเป็นแขนกลแบบ Articulated ที่มี 5 ข้อต่อและ 1 มือจับยึด ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 ซึ่งในการทดสอบในหัวข้อนี้จะทดสอบในด้านต่างๆประกอบไปด้วย การควบคุมแขนกลที่องศาอิสระที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ในทุกๆองศาอิสระ การควบคุมที่ค่าขนาดของการก้าวเดินต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงขนาดของการก้าวเดินที่เหมาะสมที่สุดในการทำงาน ควบคุมที่การวางวัตถุไว้ในตำแหน่งต่างๆภายในพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์

ในการทดลองนี้ ได้ทำการขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบกล้อง โดยทำการติดตั้งกล้องไว้ที่ตำแหน่งปลายของแขนกลดังแสดงในรูปที่ 4.1 ของบทที่ 4 โดยกำหนดให้แกนอ้างอิงมีจุดกำเนิดอยู่ที่ฐานของแขนกล เป้าหมายของการควบคุมคือขับเคลื่อนแขนกลโดยให้วัตถุเป้าหมายอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางภาพ จากลักษณะการวางกล้องดังกล่าวนี้ กล้องจะวัดตำแหน่งของวัตถุสัมพันธ์กับปลายแขนกล เมื่อแขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ปลายแขนกลจะต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับวัตถุ

ตัวควบคุมอาศัยหลักการปรับตำแหน่งแขนกลตามที่ได้อธิบายก่อนหน้านี ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ในบทที่ 3 โดยในวงควบคุม ระบบจะเปรียบเทียบพารามิเตอร์รูปภาพ ณ ปัจจุบันกับ

พารามิเตอร์รูปภาพที่ต้องการ ผลต่างก็คือความผิดพลาดของพารามิเตอร์ จากนั้นนำเวกเตอร์ความผิดพลาดนี้ไปคูณกับจาโคเบียนรูปภาพผกผัน สิ่งที่ได้คือทิศทางในการปรับตำแหน่งแกนกล เพื่อให้ความผิดพลาดของพารามิเตอร์รูปภาพมีค่าลดลง เมื่อนำทิศทางนี้ไปคูณกับช่วงของการก้าวเดิน ก็จะได้ขนาดในการปรับตำแหน่งแกนกล เมื่อปรับแกนกลตามขนาดที่คำนวณได้นี้ ก็จะทำให้พารามิเตอร์รูปภาพมีค่าเข้าใกล้พารามิเตอร์ที่ต้องการมากขึ้น เมื่อทำซ้ำวงรอบนี้ไปเรื่อยๆ แกนกลจะเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย อย่างไรก็ตาม วงรอบนี้ต้องอาศัยจาโคเบียนรูปภาพที่แม่นยำ

ในการทดลอง เป้าหมายของการควบคุมคือขับเคลื่อนแกนกลให้กล้องมองเห็นวัตถุอยู่กลางภาพ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวัตถุในรูปภาพ (Image Coordinate;  $(x, y)$ ) อยู่ที่ตำแหน่ง  $(0, 0)$  โดยตอนต้นจะแสดงถึงตัวอย่างในการประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพจากการเคลื่อนที่ที่ห้องสี่เหลี่ยมเท่ากับ 3 และพารามิเตอร์รูปภาพเท่ากับ 2 เมื่อเริ่มต้นวัตถุปรากฏอยู่ที่มุมด้านบนซ้าย (ตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  เท่ากับ  $(54, 47)$  ตามลำดับ) การควบคุมเริ่มจากการเคลื่อนที่ข้อต่อแรกเท่ากับ 2 องศาในก้าวเดินแรก เคลื่อนที่ข้อต่อที่สองเท่ากับ 2 องศาในก้าวเดินที่สอง และเคลื่อนที่ข้อต่อที่สามเท่ากับ 2 องศาในก้าวเดินที่สาม การเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้พารามิเตอร์รูปภาพมีค่าเปลี่ยนไปเป็น  $(55, 41)$  ในก้าวเดินแรก  $(55, 43)$  ในก้าวเดินที่สอง และ  $(53, 42)$  ในก้าวเดินที่สาม จากข้อมูลการเคลื่อนที่ดังกล่าว สามารถนำไปสร้าง  $DQ$  และ  $DF$  ได้ดังนี้

$$DQ = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, DF = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 \\ -6 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถนำไปประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพได้จาก  $\hat{J}_\theta = DF \cdot DQ^{-1}$  ได้เท่ากับ

$$\hat{J}_\theta = DF \cdot DQ^{-1} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & -0.1 \\ -0.3 & 0.1 & -0.5 \end{bmatrix}$$

ที่จุดนี้ พารามิเตอร์รูปภาพมีความผิดพลาดเท่ากับ  $(53, 42)$  และสามารถหาขนาดในการปรับข้อต่อได้จาก  $\Delta\theta = -k \cdot \hat{J}_\theta^+ \Delta f$  โดยกำหนดให้  $k$  เท่ากับ 0.05 และทำการหาค่า  $\hat{J}_\theta^+$  ได้ตามทฤษฎีของเมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม ดังนี้

จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $\hat{J}_\theta$  ซึ่งมีขนาด  $2 \times 3$  จะเห็นได้ว่ามีจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพน้อยกว่าจำนวนขององศาในการเคลื่อนที่ จึงใช้เมตริกซ์จาโคเบียนผกผันเทียม  $\hat{J}_\theta^+ = \hat{J}_\theta^T \cdot (\hat{J}_\theta \cdot \hat{J}_\theta^T)^{-1}$  ในการหาค่าของเมตริกซ์ผกผันเทียม จึงสามารถหาขนาดของการปรับข้อต่อได้ดังนี้



$$\Delta \bar{a} = \hat{J}_\theta^+ \Delta \bar{f} \text{ และ } \Delta \theta = 0.05 \times \frac{\Delta \bar{a}}{|\Delta \bar{a}|}$$

$$\Delta \bar{\theta} = [0.1845 \quad -0.8152 \quad 4.9297]^T$$

จากสมการดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาการปรับข้อต่อแรก ข้อต่อที่สอง และข้อต่อที่สาม ได้เท่ากับ 0.1845, -0.8152 และ 4.9297 ตามลำดับ เมื่อทำการปรับข้อต่อตามนี้ พบว่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเป็น (53, 45) ซึ่งเป็นผลให้  $DQ$  และ  $DF$  เปลี่ยนไปเป็น

$$DQ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1845 \\ 2 & 0 & -0.8152 \\ 0 & 2 & 4.9297 \end{bmatrix}, \quad DF = \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 2 & -1 & 3 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถนำไปประมาณหาค่าจาโคเบียนรูปภาพจาก  $\hat{J}_\theta = DF \cdot DQ^{-1}$  ได้เท่ากับ

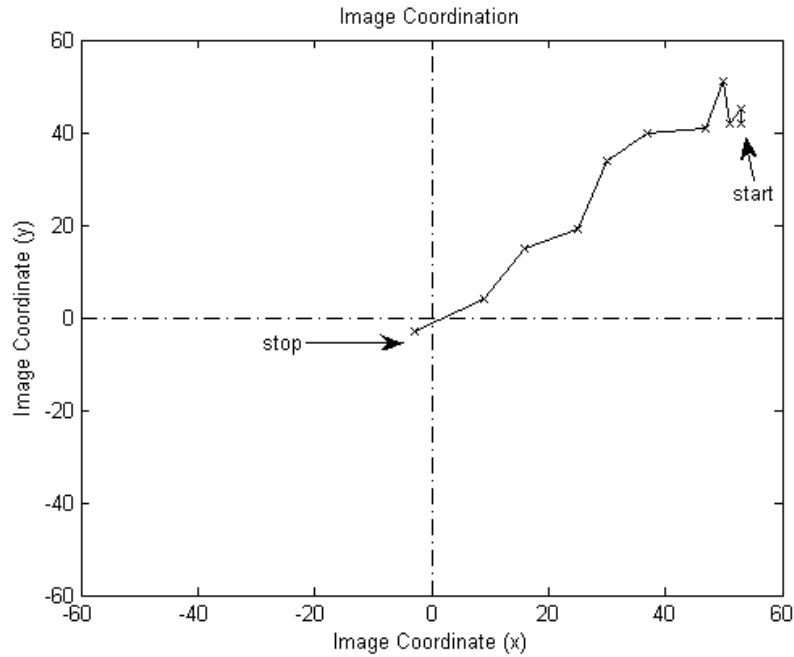
$$\hat{J}_\theta = DF \cdot DQ^{-1} = \begin{bmatrix} 26.7225 & 0 & -1 \\ 34.0424 & 1 & -0.5 \end{bmatrix}$$

ณ จุดนี้ พารามิเตอร์รูปภาพจะมีความผิดพลาดเท่ากับ (53, 45) และสามารถหาขนาดในการปรับข้อต่อได้จาก  $\Delta \bar{\theta} = -k \cdot \hat{J}_\theta^+ \Delta \bar{f}$  โดยที่  $k$  เท่ากับ 0.05 ดังนี้

$$\Delta \bar{a} = \hat{J}_\theta^+ \Delta \bar{f} \text{ และ } \Delta \theta = 0.05 \times \frac{\Delta \bar{a}}{|\Delta \bar{a}|}$$

$$\Delta \bar{\theta} = [0.4403 \quad -3.9308 \quad -3.0586]^T$$

จากสมการดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาการปรับข้อต่อแรก ข้อต่อที่สอง และข้อต่อที่สาม ได้เท่ากับ 0.4403, -3.9308 และ -3.0586 ตามลำดับ เมื่อทำการปรับข้อต่อตามนี้ พบว่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเป็น (51, 42) จะเห็นได้ว่าการปรับข้อต่อตามวิธีการที่นำเสนอจะลดความผิดพลาดของพารามิเตอร์รูปภาพลงจาก (53, 42) เป็น (53, 45) และเป็น (51, 42) ตามลำดับ เมื่อทำขบวนการนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจะลู่เข้าสู่เป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม

### 5.2.1 การทดสอบควบคุมแขนกลที่องศาอิสระต่างๆ

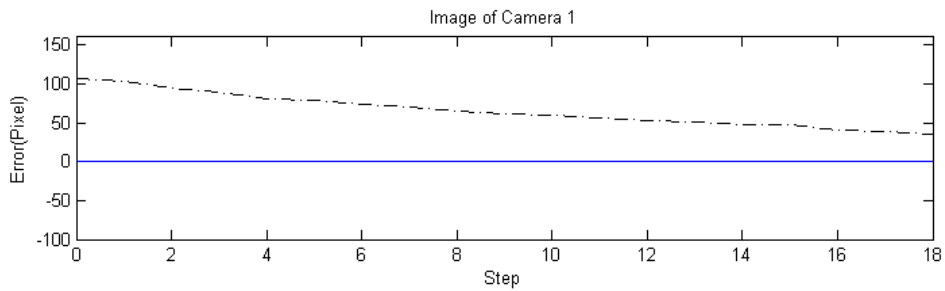
ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบถึงการเปลี่ยนแปลงขององศาอิสระของแขนกล โดยองศาอิสระของแขนกลคือจำนวนของข้อต่อที่จะทำการเคลื่อนที่ โดยในการทดสอบจะประกอบไปด้วยองศาอิสระตั้งแต่ 1 องศาอิสระไปจนถึง 4 องศาอิสระ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำเพียงในส่วนของการจ้องมองวัตถุเป้าหมายเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพ  $\Delta f$  ที่จำเป็นจะต้องมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนขององศาอิสระที่จะทำการเคลื่อนที่ และข้อจำกัดของการมองเห็นซึ่งในส่วนนี้จะใช้กล้องเพียงแคตัวเดียวจึงไม่เพียงพอที่จะระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้ แต่ก็เป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าทฤษฎีที่นำมาใช้นั้นมีความถูกต้อง

เนื่องจากการทดสอบนี้มีการใช้กล้องเพียงตัวเดียว เมื่อนำไปใช้กับจำนวนองศาอิสระที่มากกว่า 2 จึงต้องมีการนำทฤษฎีของการแปลงจาโคเบียนผกผันเทียมมาใช้ เพื่อให้สามารถทำการแปลงโดยที่มีจำนวนของพารามิเตอร์รูปภาพน้อยกว่าจำนวนขององศาอิสระได้อย่างถูกต้อง

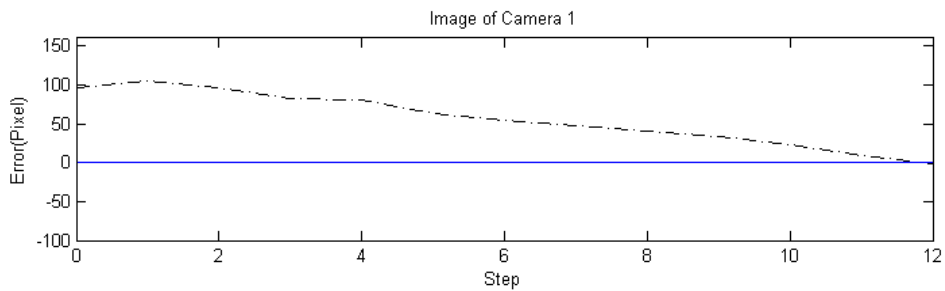
รูปที่ 5.2 แสดงการจ้องมองวัตถุของแขนกลที่องศาอิสระต่างๆ โดยในแนวนอนจะแสดงจำนวนก้าวเดินที่ใช้ และแนวตั้งจะแสดงความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางวัตถุเทียบกับจุดศูนย์กลางภาพ จะเห็นได้ว่าจากรูปนั้น ทุกๆ องศาอิสระจะสามารถที่จะลู่เข้าสู่คำตอบได้เสมอ

ในที่นี้กำหนดให้ พารามิเตอร์รูปภาพ 1 ตัวคือตำแหน่งของวัตถุที่มองเห็นตามแนวแกนนอน และพารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัวคือตำแหน่งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนของวัตถุที่

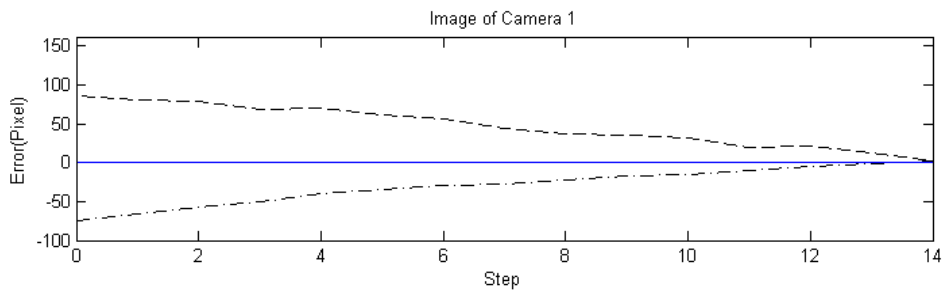
มองเห็นจากกล้อง โดยกำหนดให้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 และเป้าหมายคือให้วัตถุอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางภาพไม่เกิน 10 จุดภาพทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนสำหรับพารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัว และ ไม่เกิน 10 จุดภาพในแนวแกนนอนสำหรับพารามิเตอร์รูปภาพ 1 ตัว



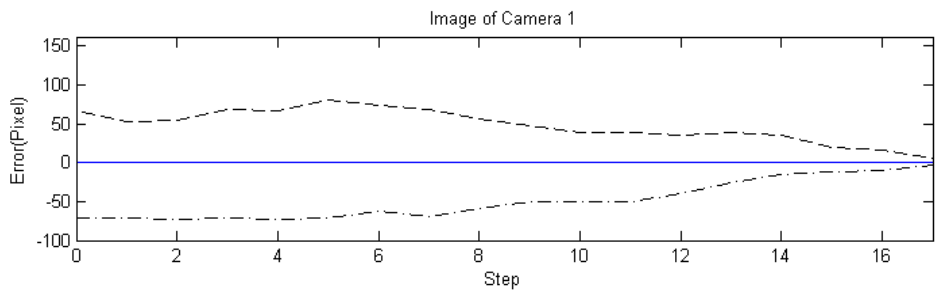
ก) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 1 องศาอิสระ และ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ



ข) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ และ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ



ค) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ



ง) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ

รูปที่ 5.2 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่องศาอิสระ

## 5.2.2 การทดสอบควบคุมแขนกลที่ค่าขนาดของการก้าวเดินต่างๆ

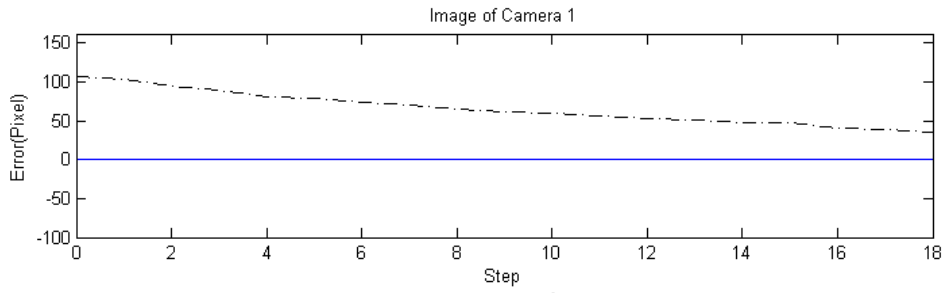
ในวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งข้อต่อแขนกลและการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ กล่าวคือเมื่อมีการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง  $\Delta\theta'$  จะทำให้แขนกลเคลื่อนที่ไปจริง  $\Delta\theta$  ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของตัวควบคุมแขนกล การเคลื่อนที่ข้อต่อแขนกล  $\Delta\theta$  จะเป็นผลทำให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\Delta f$  ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ในจำนวนจุดเวลาเท่ากับความอิสระของระบบ ก็จะสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาได้ ให้สังเกตว่าจาโคเบียนรูปภาพที่มีค่าแม่นยำ ก็จะต้องประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพขึ้นจากความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งแขนกลที่อยู่ใกล้กัน นั่นก็คือช่วงของการก้าวเดินต้องมีขนาดเล็กมากพอ

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการควบคุม พบว่าแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแขนกลจะทำงานไม่สมบูรณ์ กล่าวคือไม่สามารถควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้โดยไม่มี ความผิดพลาด แต่ก็ยังสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เพราะได้ใช้ข้อมูลตำแหน่งแขนกลที่เคลื่อนที่ไปจริงในการประมาณ หลักการนี้ เป็นผลทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้ดีแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแขนกลจะไม่สมบูรณ์ก็ตาม

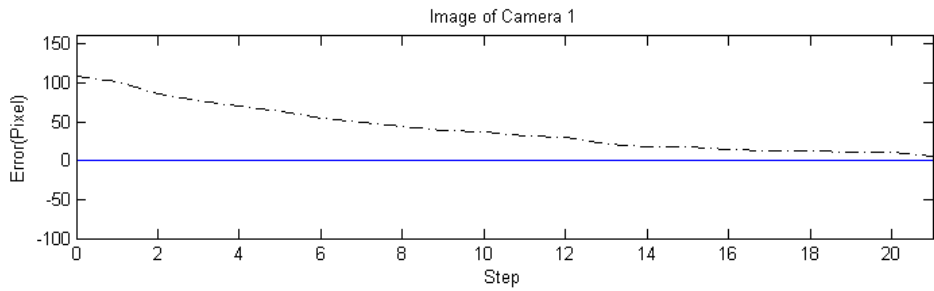
จากรูปจะแสดงการจำลองวัตถุของแขนกลที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ และองศาอิสระต่างๆ โดยรูปที่ 5.3 และ 5.4 เป็นรูปของการลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 1 และ 2 องศาอิสระตามลำดับ ซึ่งใช้พารามิเตอร์รูปภาพ 1 ตัว และรูปที่ 5.5 และ 5.6 เป็นรูปของการลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 3 และ 4 องศาอิสระตามลำดับ ซึ่งใช้พารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัว โดยในแนวนอนจะแสดงจำนวนก้าวเดินที่ใช้ และแนวตั้งจะแสดงความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางวัตถุเทียบกับจุดศูนย์กลางภาพ จะเห็นได้ว่าจากรูปนั้น ทุกๆขนาดของการก้าวเดินที่ทุกองศาอิสระ จะสามารถที่จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เสมอโดยจะมีความเร็วของการลู่เข้าสู่ค่าตอบที่แตกต่างกัน โดยถ้ากำหนดให้มีขนาดของการก้าวเดินที่มาก ก็จะลู่เข้าสู่ค่าตอบได้เร็วกว่ากำหนดให้มีขนาดของการก้าวเดินที่น้อย แต่ถ้าขนาดของการก้าวเดินที่มากจนเกินไปก็จะส่งผลให้การลู่เข้านั้นแกว่งอยู่รอบค่าตอบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าขนาดของการก้าวเดินที่น้อยจนเกินไปก็จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพมีค่าน้อยหรืออาจจะเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าจาโคเบียนนั้นถูกหารด้วยศูนย์ ส่งผลให้การลู่เข้าสู่ค่าตอบไม่เกิดขึ้น ดังนั้นในการเลือกค่าขนาดของการก้าวเดินนั้น ควรเลือกค่าซึ่งไม่มากหรือน้อยจนเกินไป โดยปกติแล้ว ค่าขนาดของการก้าวเดินควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในที่นี้กำหนดให้ พารามิเตอร์รูปภาพ 1 ตัวคือตำแหน่งของวัตถุที่มองเห็นตามแนวแกนนอน และพารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัวคือตำแหน่งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนของวัตถุที่มองเห็นจากกล้อง และเป้าหมายคือให้วัตถุอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางภาพไม่เกิน 10 จุดภาพทั้งแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนสำหรับพารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัว และ ไม่เกิน 10 จุดภาพในแนวแกนนอนสำหรับพารามิเตอร์รูปภาพ 1 ตัว

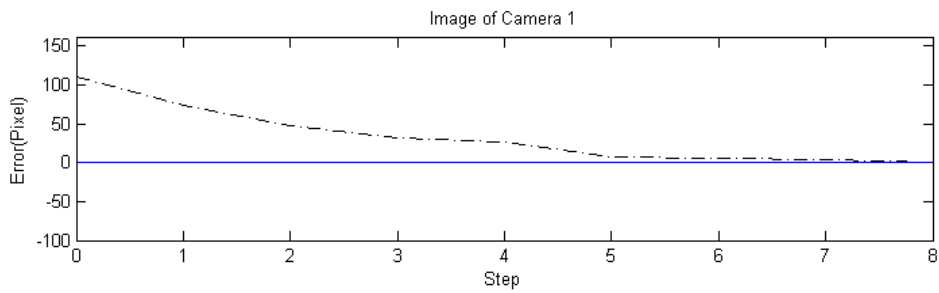
ในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 จะเป็นการแสดงถึงการเปรียบเทียบขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 3 และ 4 องศาอิสระตามลำดับ ซึ่งใช้พารามิเตอร์รูปภาพ 2 ตัว โดยแบ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง และ ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE (root mean square error) ซึ่งการเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้องนั้นจะแสดงถึงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ผู้เข้าหาเป้าหมายที่ตำแหน่งเริ่มต้นเดียวกัน โดยที่สามารถที่จะจ้องมองวัตถุได้อย่างถูกต้อง และค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จะแสดงถึงการลดขนาดของความผิดพลาดลงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าที่ค่าขนาดของการก้าวเดินมากจะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงเร็วกว่าค่าขนาดของการก้าวเดินน้อย



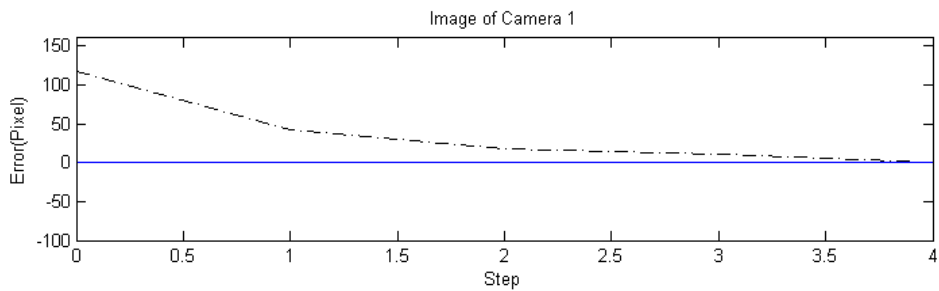
ก) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05



ข) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

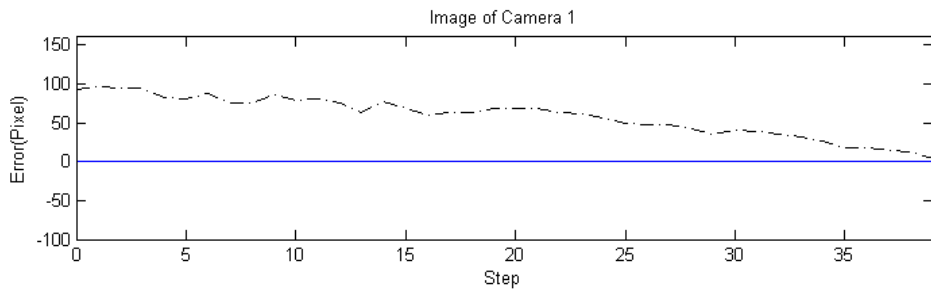


ค) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.3

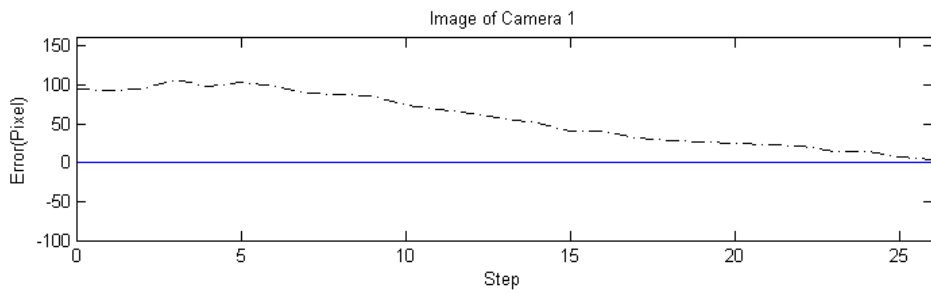


ง) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.5

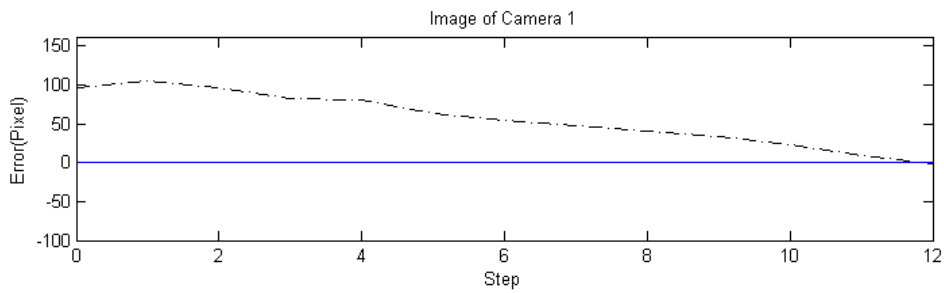
รูปที่ 5.3 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 1 องศาอิสระ และ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ



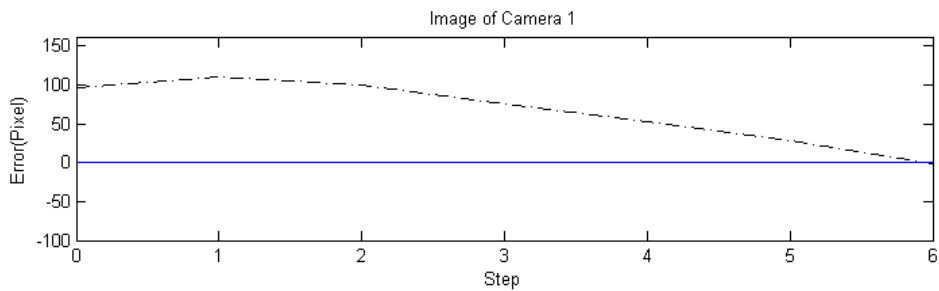
ก) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.02



ข) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.03

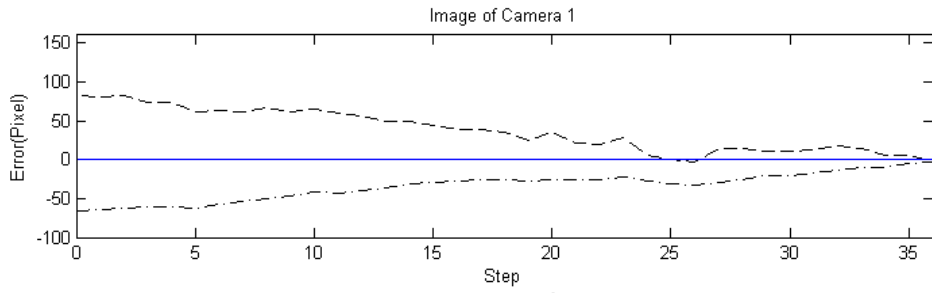


ค) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05

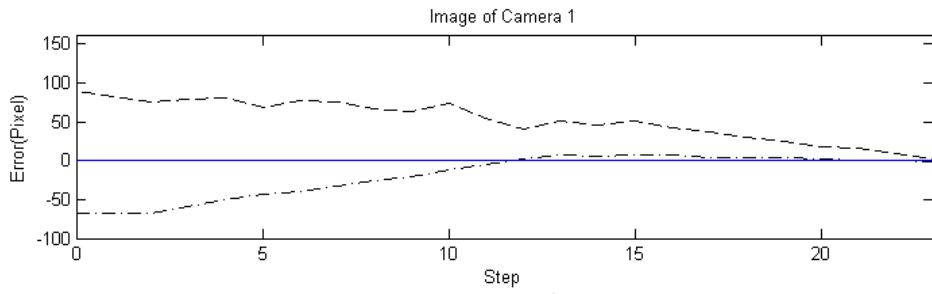


ง) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

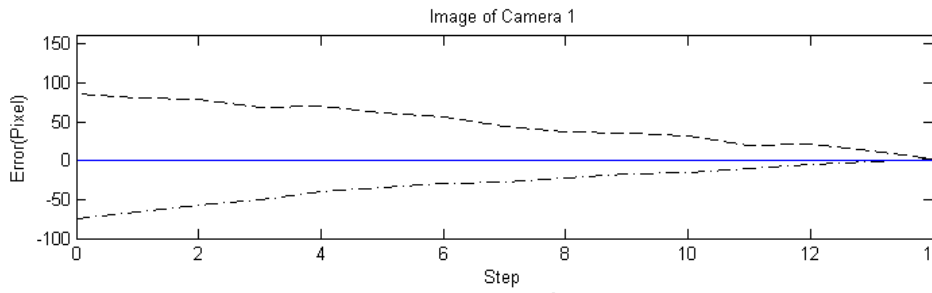
รูปที่ 5.4 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 2 องศาอิสระ และ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ



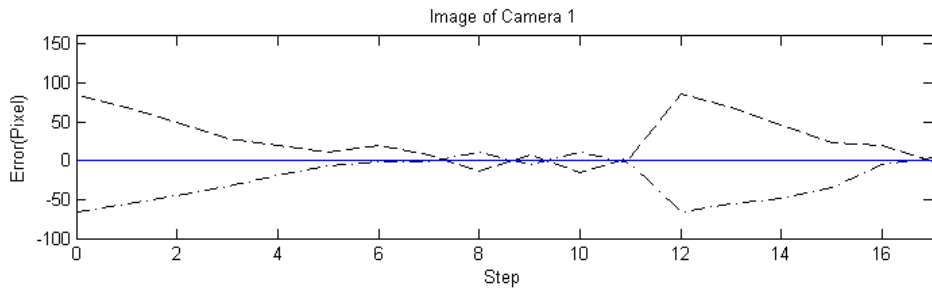
ก) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.02



ข) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.03



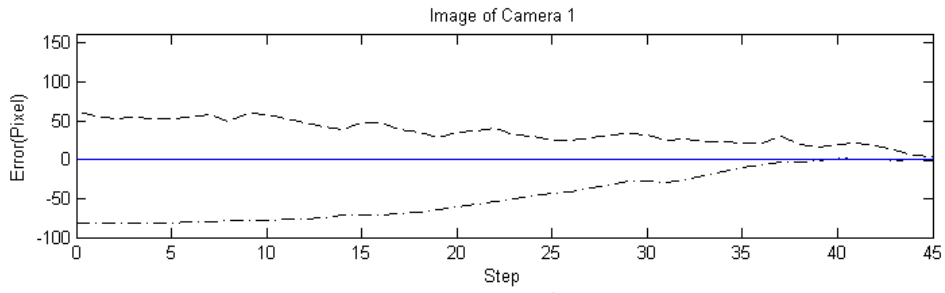
ค) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05



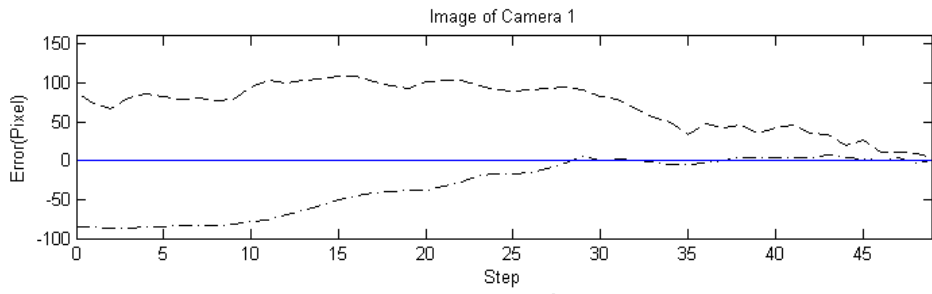
ง) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

รูปที่ 5.5 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 3 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ

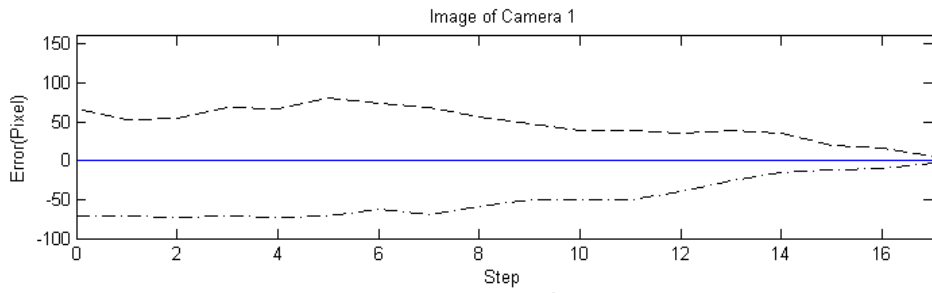




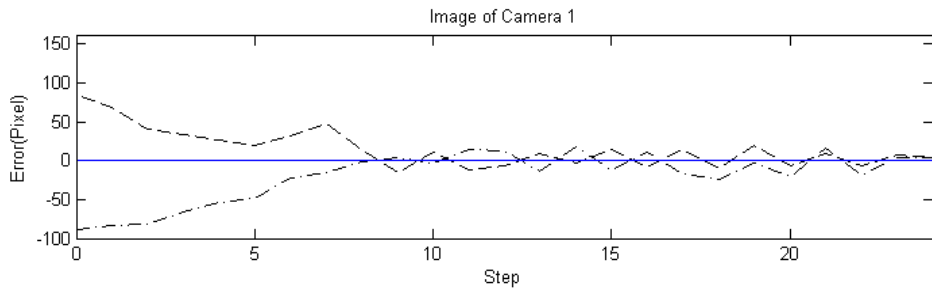
ก) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.02



ข) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.03

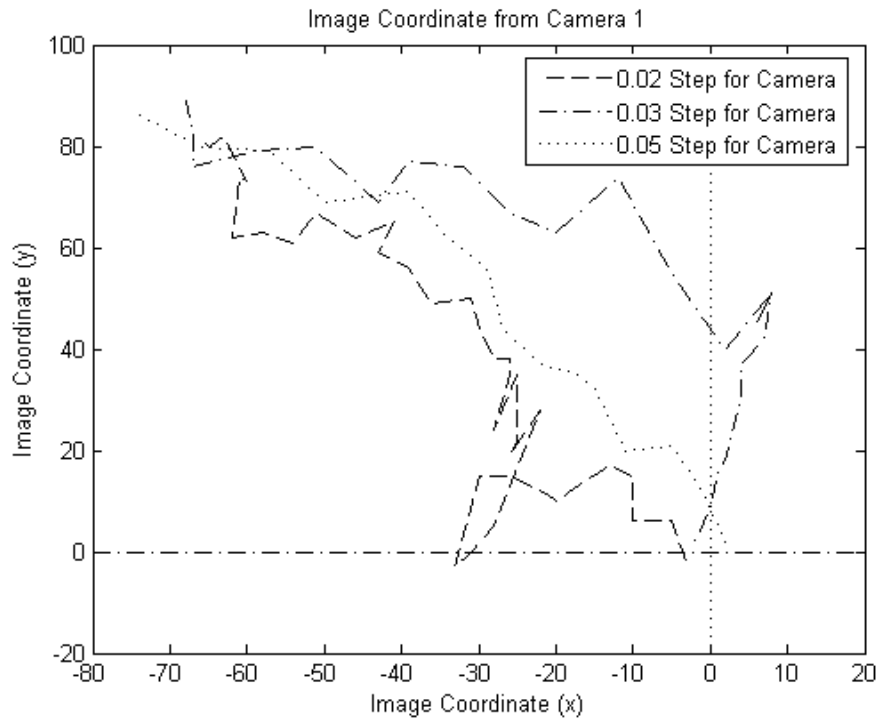


ค) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05



ง) การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

รูปที่ 5.6 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 4 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ

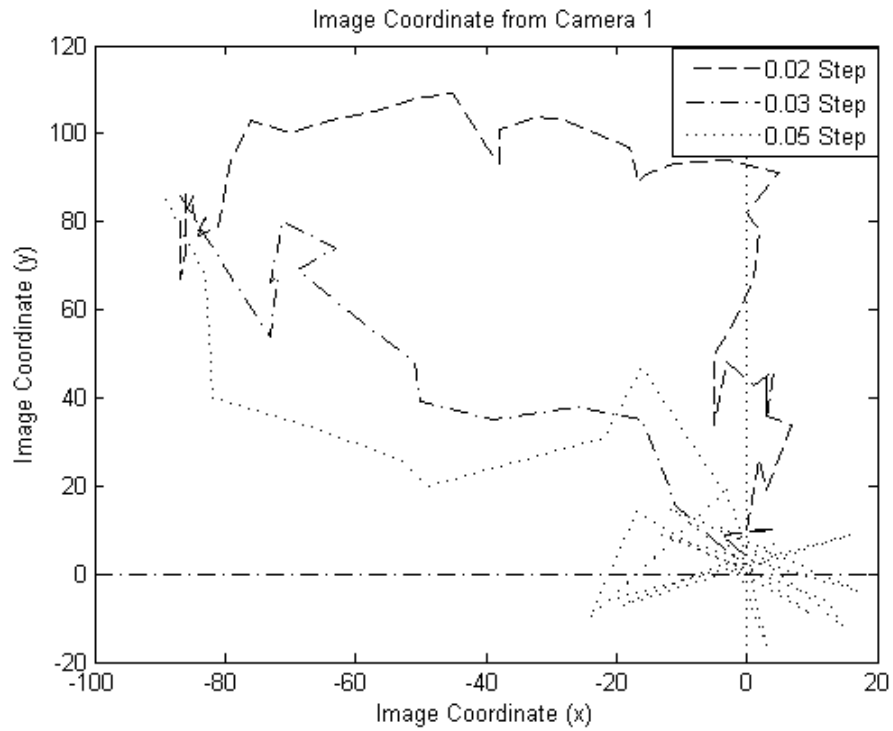


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 3 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ



ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบขนาดของการก้าวเดินต่างๆ ที่ 4 องศาอิสระ และ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างของข้อมูลการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่องศาอิสระต่างๆ

|                                 | จำนวนก้าวเดิน ที่ความยาวช่วงก้าวเดินต่างๆ |      |      |     |
|---------------------------------|-------------------------------------------|------|------|-----|
|                                 | 0.02                                      | 0.03 | 0.05 | 0.1 |
| 1 องศาอิสระ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ | 62                                        | 45   | 31   | 22  |
| 2 องศาอิสระ 1 พารามิเตอร์รูปภาพ | 39                                        | 27   | 13   | 7   |
| 3 องศาอิสระ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ | 37                                        | 24   | 15   | 11  |
| 4 องศาอิสระ 2 พารามิเตอร์รูปภาพ | 46                                        | 49   | 18   | 24  |

ตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าที่ความยาวช่วงก้าวเดินน้อยจะส่งผลให้การลู่เข้าช้ากว่า ขนาดความยาวช่วงก้าวเดินมาก ในกรณีของ 1 2 และ 3 องศาอิสระ จะเป็นการลู่เข้าหาเป้าหมายที่เร็วขึ้นถ้ามีขนาดความยาวของการก้าวเดินที่มากขึ้น แต่ในกรณีของ 4 องศาอิสระนั้น ขนาดความยาวของการก้าวเดินที่มากจนเกินไปจะส่งผลให้การลู่เข้าช้า อันเนื่องมาจากการลู่เข้านั้นจะมีการแกว่งไปรอบๆคำตอบ ซึ่งการแกว่งนี้เกิดจากการที่มีขนาดความยาวของการก้าวเดินที่มากจนเกินไป ทำให้ระบบไม่สามารถที่จะเข้าไปสู่คำตอบได้อย่างรวดเร็ว ถ้าสังเกตจากกราฟในรูปที่ 5.6 (ง) จะเห็นได้ว่าแท้จริงแล้วนั้น ที่ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ระบบจะเริ่มแกว่งรอบๆคำตอบ ตั้งแต่จำนวนของการก้าวเดินเท่ากับ 10 ดังนั้นในการเลือกขนาดของการก้าวเดินควรเลือกให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

### 5.3 การทดสอบควบคุมแขนกลโดยใช้การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต

การทดสอบควบคุมในส่วนนี้จะเป็นการพัฒนาจากการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพเดิม โดยได้พัฒนาให้สามารถที่จะระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้ โดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพที่เป็นตำแหน่งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนจากกล้องสองตัว

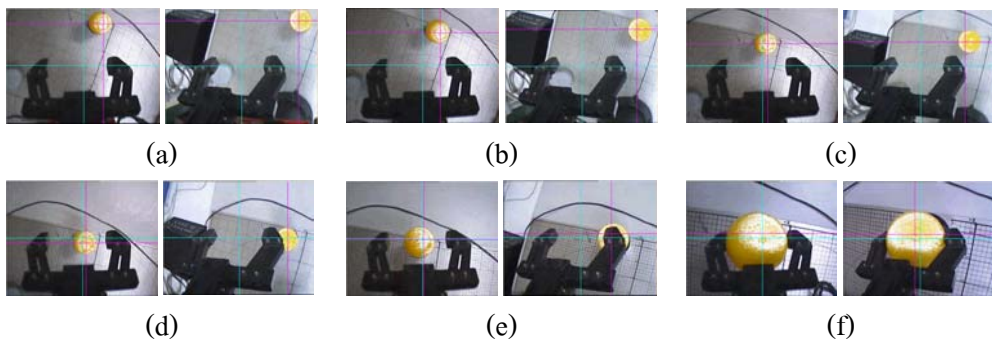
การพัฒนานี้ได้อาศัยหลักการของการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบเดิม และใช้นิยามความสัมพันธ์ของการรวมกันแบบเมตริกซ์ จึงทำให้การใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอไม่ผิดไปจากนิยามของการเคลื่อนที่โดยอาศัยจาโคเบียนรูปภาพแบบเดิม และสามารถที่จะทำให้แขนกลนั้นสามารถลู่เข้าหาเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าของการขับเคลื่อนโดยอาศัยภาพที่ใช้วิธีการจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะทำให้ทั้งตำแหน่งและทิศทางของ

แขนกลนั้นเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุ ไม่ว่าจะวัตถุจะอยู่ในตำแหน่งใดในพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่างการทำงานของแขนกลที่ใช้วิธีการจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอ ในสถานะต่างๆ ตามลำดับของการเคลื่อนที่ รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่างภาพที่ได้จากมุมมองของกล้องที่ติดตั้งที่ปลายแขนกลในการควบคุมขับเคลื่อนโดยอาศัยภาพ ที่ใช้ระบบจาโคเบียนแบบสเตอริโอ



รูปที่ 5.9 การเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายของแขนกล



รูปที่ 5.10 มุมมองกล้องในการเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายซึ่งใช้การขับเคลื่อนโดยอาศัยภาพ

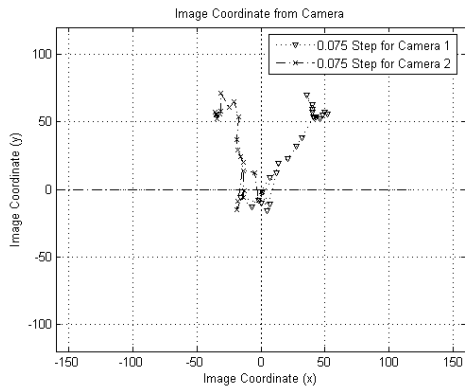
ในการทดลองนี้ได้จำลองการขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบกล้องกับแขนกลทดสอบ SCORBOT®-ER III ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC ซึ่งเป็นแขนกลแบบข้อต่อ (Articulated) ที่มี 5 ข้อต่อและ 1 มือจับยึด วัตถุประสงค์ก็เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมแบบประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอกับกรณีที่มีจำนวนพารามิเตอร์รูปภพน้อยกว่าองศาอิสระในการเคลื่อนที่ และต้องการควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่เพื่อลู่เข้าหาเป้าหมายได้อย่างถูกต้องในปริภูมิสามมิติ พารามิเตอร์รูปภพที่ใช้ในการควบคุมนี้คือตำแหน่งในแนวนอน และแนวตั้งจากกล้องทั้งสองตัว กล่าวคือควบคุมให้หุ่นยนต์มองเห็นวัตถุอยู่กึ่งกลางภาพจากกล้องทั้งสองตัว

### 5.3.1 การทดสอบควบคุมแขนกลที่องศาอิสระต่างๆ

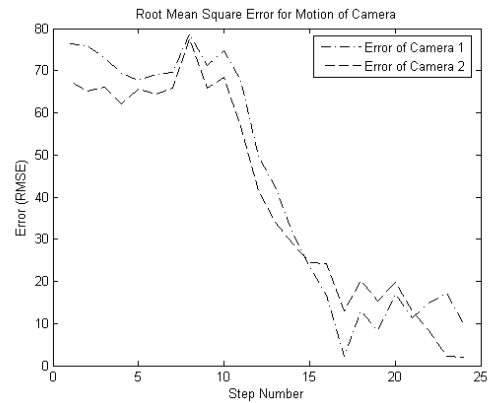
ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบถึงการเปลี่ยนแปลงขององศาอิสระของแขนกล โดยองศาอิสระของแขนกลคือจำนวนของข้อต่อที่จะทำการเคลื่อนที่ ในการทดสอบประกอบไปด้วยองศาอิสระตั้งแต่ 1 องศาอิสระไปจนถึง 4 องศาอิสระ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำในส่วนของการเข้าหยิบจับวัตถุเป้าหมาย เนื่องจากได้ทำการชดเชยจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพที่มีจำนวนน้อยด้วยการใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอทำให้ลดข้อจำกัดของจำนวนพารามิเตอร์รูปภาพ  $\Delta f$  ที่จำเป็นจะต้องมีจำนวนมากว่าหรือเท่ากับจำนวนขององศาอิสระที่จะทำการเคลื่อนที่ และเนื่องจากจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอนี้ได้มีการใช้กล้อง 2 ตัวจึงเพียงพอที่จะระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในปริภูมิสามมิติได้ และเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าทฤษฎีที่นำมาใช้นั้นมีความถูกต้อง

เนื่องจากการทดสอบนี้มีการใช้จำนวนพารามิเตอร์รูปภาพน้อยกว่าจำนวนขององศาอิสระในการเคลื่อนที่ เมื่อนำไปใช้กับจำนวนองศาอิสระที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3 จึงต้องมีการนำทฤษฎีของการแปลงจาโคเบียนผกผันเทียมมาใช้ เพื่อให้สามารถทำการแปลงโดยที่มีจำนวนของพารามิเตอร์รูปภาพน้อยกว่าจำนวนขององศาอิสระได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 เป็นการเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุเป้าหมายเพื่อทำการหยิบจับ โดยในการทดลองส่วนนี้ได้ใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075 จะสังเกตได้ว่าแขนกลสามารถทำการหยิบจับวัตถุเป้าหมายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งในภาพ ก) ของทั้งสองรูปเป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยอาศัยมุมมองของกล้อง โดยรวมภาพที่ได้จากกล้องทั้ง 2 ตัวมาไว้ในกราฟเดียวกันเพื่อให้สามารถที่จะสังเกตการลู่เข้าของกล้องทั้งสองได้โดยง่าย ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าแขนกลนั้นมีการลู่เข้าหาวัตถุเป้าหมายพร้อมกันเนื่องมาจาก จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ นั้นจะทำให้การปรับขนาดขององศาในการเคลื่อนที่อย่างเหมาะสมเพื่อให้พารามิเตอร์รูปภาพทุกตัวลู่เข้าหาคำตอบพร้อมกัน ในการทดลองในส่วนนี้ได้ทดลองโดยให้วัตถุทดสอบอยู่ในตำแหน่งที่สมมูลกันระหว่างกล้องแต่ละตัว ในส่วนต่อไปจะอธิบายถึงการลู่เข้าเมื่อวัตถุอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ในส่วนของรูป ข) นั้นจะเป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการลู่เข้า โดยจะเห็นได้ว่าภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองนั้นมีอัตราในการลู่เข้าอย่างต่อเนื่อง และมีขนาดของความผิดพลาดลดลงพร้อมกัน

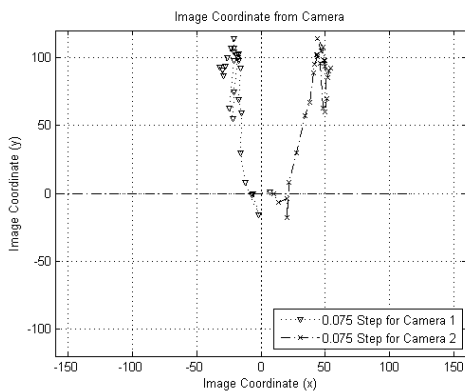


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

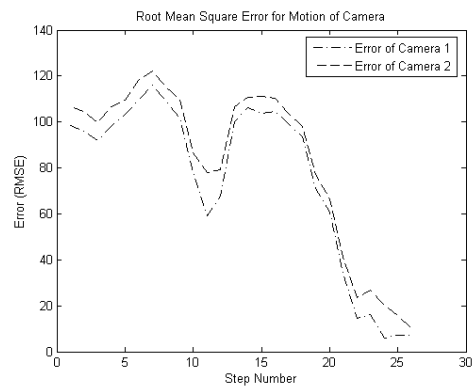


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.11 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ 3 องศาอิสระ



ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.12 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ 4 องศาอิสระ

### 5.3.2 การทดสอบควบคุมแขนกลที่ค่าขนาดของการก้าวเดินต่างๆ

ในวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งข้อต่อแขนกลและการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ กล่าวคือเมื่อมีการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง  $\Delta\theta'$  จะทำให้แขนกลเคลื่อนที่ไปจริง  $\Delta\theta$  ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของตัวควบคุมแขนกล การเคลื่อนที่ข้อต่อแขนกล  $\Delta\theta$  จะเป็นผลทำให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\Delta f$  ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ในจำนวนจุดเวลาเท่ากับความอิสระของระบบ ก็จะสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาได้ ให้สังเกตว่าจาโคเบียนรูปภาพที่มีค่าแม่นยำ ก็จะต้องประมาณค่า

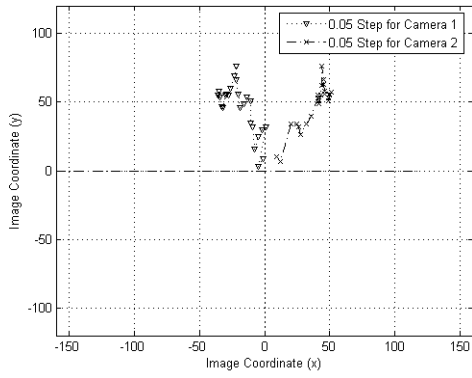
จาโคเบียนรูปภาพขึ้นจากความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งแกนกลที่อยู่ใกล้กัน นั่นก็คือช่วงของการก้าวเดินต้องมีขนาดเล็กมากพอ

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการควบคุม พบว่าแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแกนกลจะทำงานไม่สมบูรณ์ กล่าวคือไม่สามารถควบคุมแกนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้โดยไม่มี ความผิดพลาด แต่ก็ยังสามารถประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เพราะได้ใช้ข้อมูล ตำแหน่งแกนกลที่เคลื่อนที่ไปจริงในการประมาณ หลักการนี้ เป็นผลทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้ดีแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแกนกลจะไม่สมบูรณ์ก็ตาม

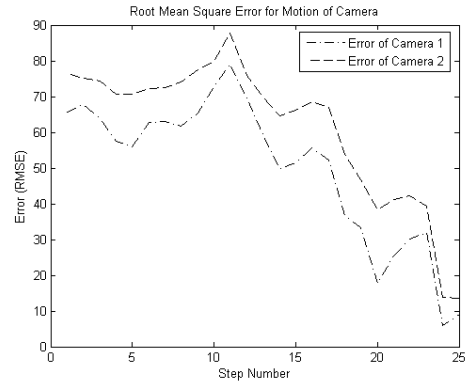
ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าขนาดของการก้าวเดินหลายค่าโดยได้แสดงเป็น ตัวอย่างขนาดของการก้าวเดิน 3 ค่าคือ 0.05, 0.075 และ 0.1 เนื่องจากค่าทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเคลื่อนที่ของการประมาณค่าจาโคเบียนสเตอริโอ โดยได้แสดงไว้ในรูปของการเคลื่อนที่ในมุมมองของกล้อง และค่าความผิดพลาดแบบ RMSE (Root Mean Square Error) ของกล้องทั้ง 2 ตัว ซึ่งการเคลื่อนที่ในมุมมองของกล้องได้ทำการรวมมุมมองของกล้องทั้ง 2 ตัวไว้ในรูปเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตผลของการลู่เข้า

รูปที่ 5.13 – 18 เป็นการลู่เข้าหาเป้าหมายของแกนกลโดยอาศัยมุมมองของกล้อง และค่าความผิดพลาด RMSE โดยจากรูปจะสังเกตได้ว่า ที่ขนาดของการก้าวเดินมากขึ้น จำนวนของการก้าวเดินก็จะลดลง แต่ก็จะมีค่าที่จำกัดอยู่ที่ค่าๆหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าค่าขนาดของการก้าวเดินมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการเปรียบเทียบค่าของพารามิเตอร์รูปภาพที่มีค่าแตกต่างกันมากทำให้ระบบเคลื่อนที่ได้ได้อย่างถูกต้องมากกว่าระบบที่มีค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์รูปภาพน้อย ดังเช่นกรณีของขนาดของการก้าวเดิน 0.05 จะเห็นได้ว่าค่าขนาดของการก้าวเดินนี้นั้น ไม่ว่าจะเป็นการใช้องศาอิสระ 3 หรือ 4 องศาอิสระ ถ้าสังเกตที่ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจะทำให้เกิดการแกว่งของค่าความผิดพลาดสูง ตรงกันข้ามกับกรณีของขนาดของการก้าวเดิน 0.1 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพต่อ 1 การก้าวเดินสูง จึงทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมีการแกว่งน้อย หรือลู่เข้าอย่างรวดเร็ว โดยไม่ว่าจะใช้จำนวนขององศาอิสระเท่าใดก็จะสามารถลู่เข้าหาค่าตอบได้เสมอ (ในที่นี้ใช้จำนวน 3 – 4 องศาอิสระ)



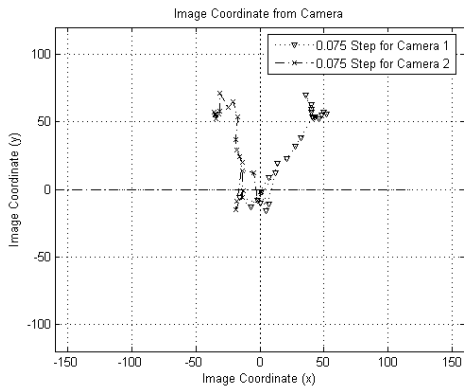


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

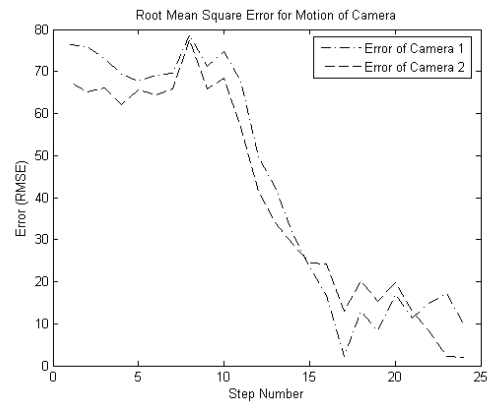


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.13 การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05

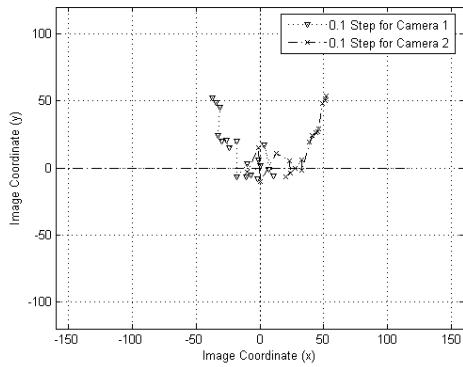


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

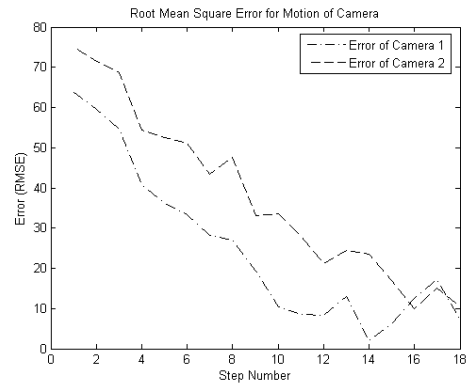


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.14 การลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075

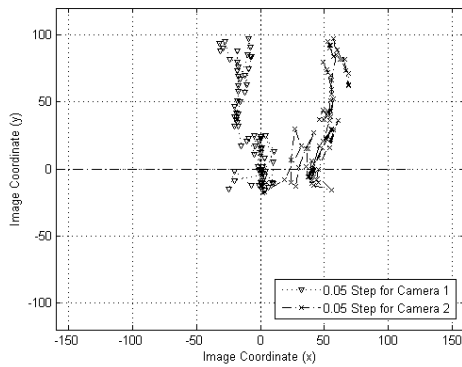


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

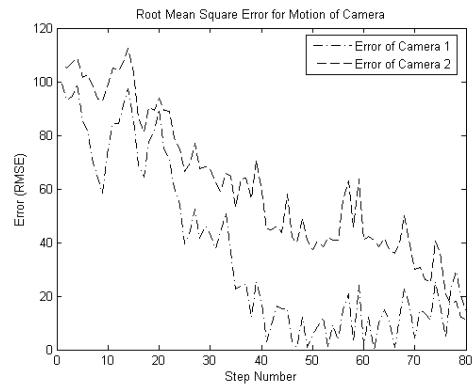


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปแบบของ RMSE

รูปที่ 5.15 การดูเข้าสู่เป้าหมายที่ 3 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

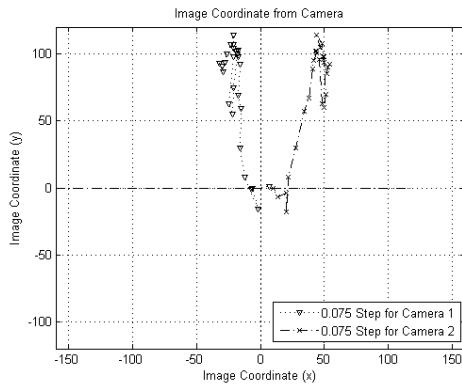


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

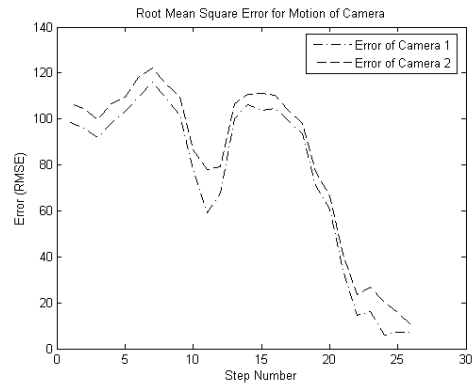


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปแบบของ RMSE

รูปที่ 5.16 การดูเข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05

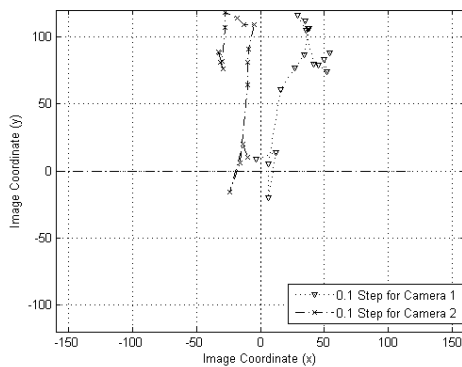


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

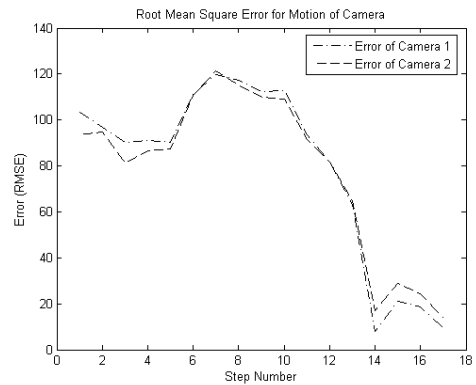


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.17 การถ่วงเข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075



ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.18 การถ่วงเข้าสู่เป้าหมายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

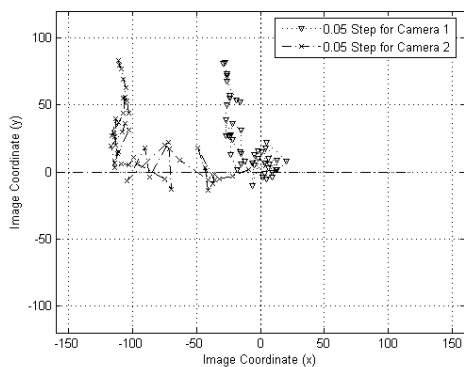
### 5.3.3 การทดสอบควบคุมแขนกลที่การวางวัตถุตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ทำงานของแขนกล

วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบการเปลี่ยนตำแหน่งการวางของวัตถุเป้าหมาย โดยได้ทำการวางวัตถุเป้าหมายไว้ในตำแหน่งต่างๆในพื้นที่ทำงานของแขนกล โดยอ้างอิงจากมุมมองทั้งสองตัว ซึ่งแบ่งเป็นการวางไว้ในตำแหน่งด้านซ้ายและด้านขวาของภาพที่มองเห็นได้จากกล้อง ซึ่งการวางวัตถุในตำแหน่งต่างๆดังกล่าวเป็นตำแหน่งสุดท้ายในการมองเห็นโดยกล้อง ในที่นี้จะมีการวางวัตถุไว้ในตำแหน่งมุมบนขวาและมุมบนซ้าย เพราะตำแหน่งด้านล่างขวาและซ้ายนั้นจะถูกบดบังด้วยส่วนปลายของแขนกลทำให้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้

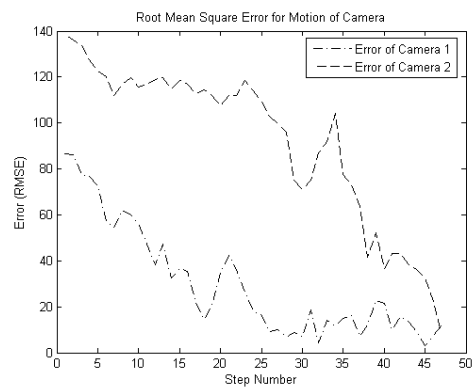
จากรูปของการเคลื่อนที่ในรูปที่ 5.19 – 5.24 จะสังกตว่าไม่ว่าวัตถุเป้าหมายวางอยู่ในตำแหน่งใดก็สามารถที่จะขับเคลื่อนแขนกลให้เข้าหาเพื่อหยิบจับวัตถุเป้าหมายได้เสมอ เมื่อ

ทำการศึกษาถึงสมรรถนะของการควบคุมเมื่อวัตถุเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งต่างๆกัน โดยใช้ช่วงขนาดของการก้าวเดินตั้งแต่ 0.05 จนถึง 0.1 พบว่าการควบคุมบรรลุตามเป้าหมายได้ในทุกกรณี กล่าวคือ วัตถุจะเคลื่อนที่ตรงเข้าสู่ศูนย์กลางภาพ หรือแขนกลจะพยายามเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุนั่นเอง

เมื่อสังเกตกรณีที่วัตถุอยู่ในตำแหน่งบนขวาในตอนเริ่มต้น พบว่าการควบคุมจะใช้จำนวนก้าวเดินน้อยกว่ากรณีที่วัตถุอยู่ในตำแหน่งบนซ้ายเสมอ ไม่ว่าจะใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่าไรก็ตาม ทั้งนี้เพราะหุ่นยนต์มีลักษณะความไม่เชิงเส้นอยู่มาก การเคลื่อนที่ข้อต่อแขนกลไปข้างหน้าและกลับหลังมีความไวต่อพารามิเตอร์รูปภาพไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้มีเสถียรภาพเพียงพอ และสามารถจัดการให้บรรลุเป้าหมายได้ทุกกรณีที่ทดลอง

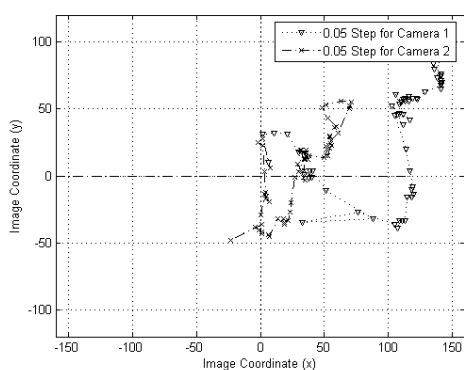


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

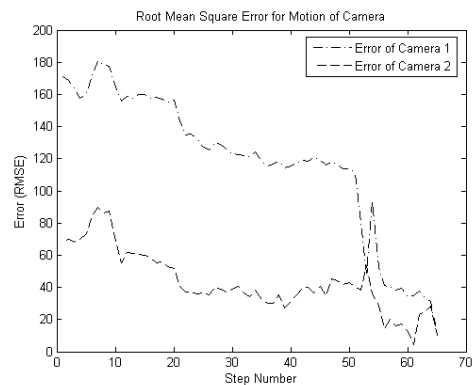


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปแบบของ RMSE

รูปที่ 5.19 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05

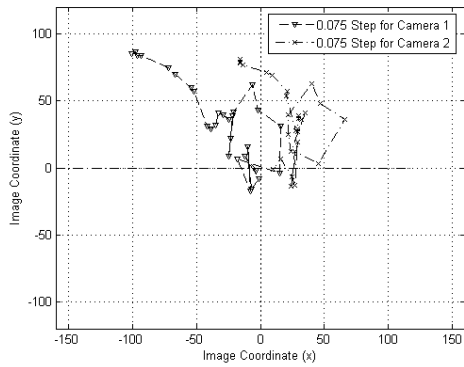


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปแบบของ RMSE

รูปที่ 5.20 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05

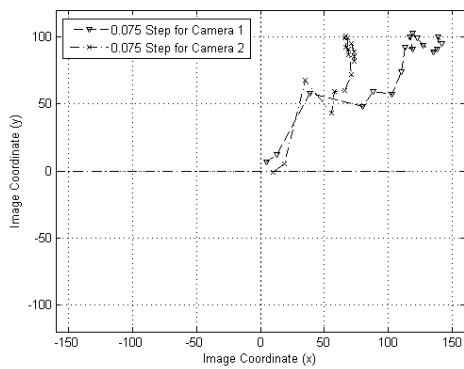


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

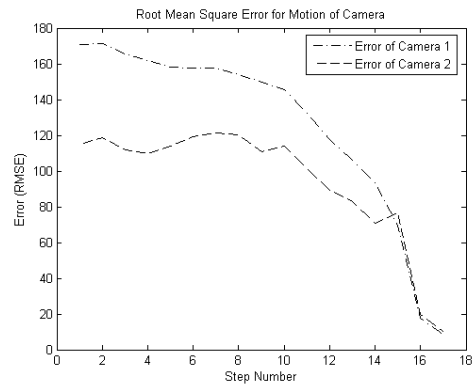


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.21 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075

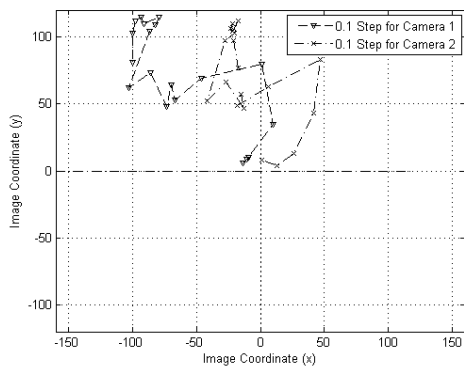


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

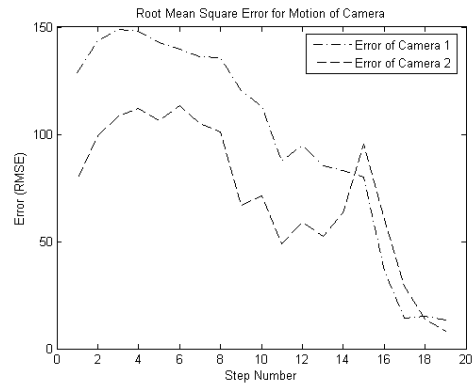


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.22 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศาอิสระ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.075

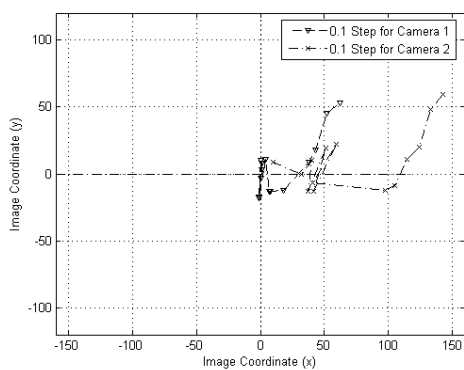


ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง

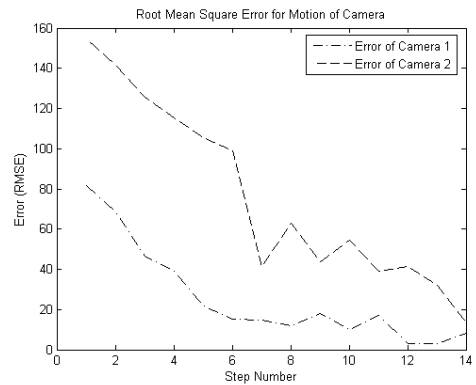


ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

รูปที่ 5.23 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนซ้ายที่ 4 องศา ระยะ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1



ก) การเคลื่อนที่โดยอาศัยมุมมองของกล้อง



ข) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE

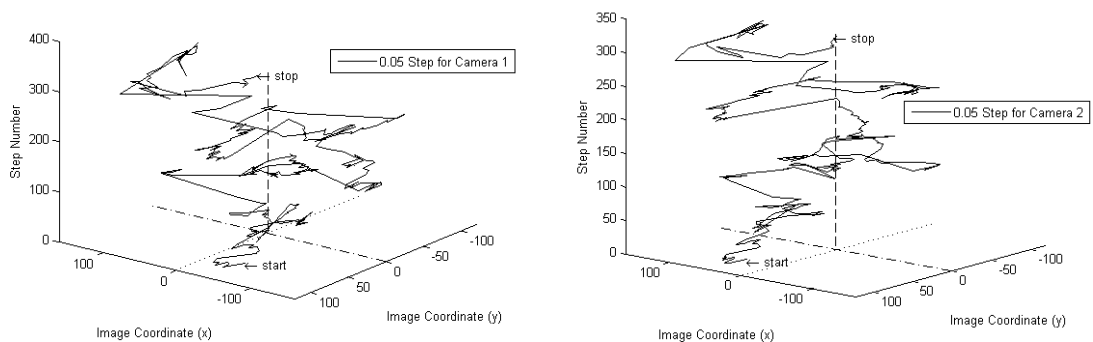
รูปที่ 5.24 การลู่เข้าสู่เป้าหมายด้านมุมบนขวาที่ 4 องศา ระยะ ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1

### 5.3.4 การทดสอบควบคุมแขนกลโดยวัตถุมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการเคลื่อนที่

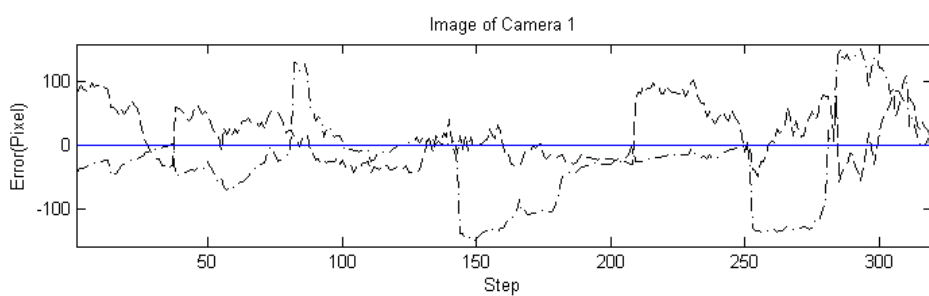
ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองให้สามารถทราบถึงสมรรถนะของวิธีการโดยมีการเคลื่อนที่วัตถุทดสอบในขณะที่ทำการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ ทั้งนี้เพราะการใช้งานจริงนั้นอาจมีการเคลื่อนที่ของวัตถุสนใจจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ว่าระบบสามารถทำงานได้แม้ว่าวัตถุที่ไม่หยุดนิ่งก็ตาม หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการประมาณค่าจาโคเบียนสเตอริโอนี้สามารถที่จะลู่เข้าหาวัตถุที่สนใจได้แม้ว่ามีการเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งทำให้ค่าที่ประมาณในตอนเริ่มต้นผิดเพี้ยนก็ตาม

รูปที่ 5.25 เป็นการลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการเคลื่อนที่ที่ 4 องศา ระยะ และขนาดก้าวเดิน 0.05 เมื่อแสดงในมุมมองต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบ

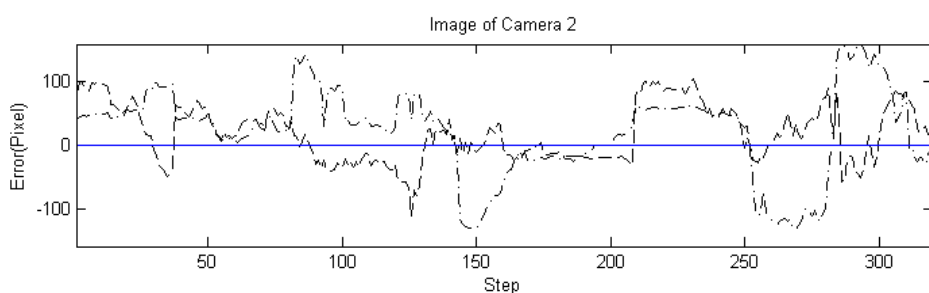
ดังนี้ รูป ก) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ค) และรูป ง) แสดงถึงการขับเคลื่อนแกนกลให้ลู่อู่เข้าหาเป้าหมาย โดยการเคลื่อนที่จะดำเนินไปเรื่อยๆ เพื่อเข้าหาเป้าหมายที่พบในภาพทั้งสอง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าเทคนิควิธีการในการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอนี้ทำให้หุ่นยนต์แกนกลสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ลู่อู่เข้าสู่จุดที่ต้องการ รูป จ) แสดงถึงค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จะเห็นได้ว่าการก้าวเดินต่าง ๆ นั้นจะมีค่าที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ค่าที่ลดลงนี้บ่งบอกถึงการลู่อู่เข้าหาเป้าหมายของแกนกล ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันนั้นคือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุ ถ้าดูจากรูปที่ 5.25 จะเห็นได้ว่าวัตถุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหลายครั้ง แต่ก็ยังสามารถที่จะลู่อู่เข้าหาเป้าหมายได้เสมอ



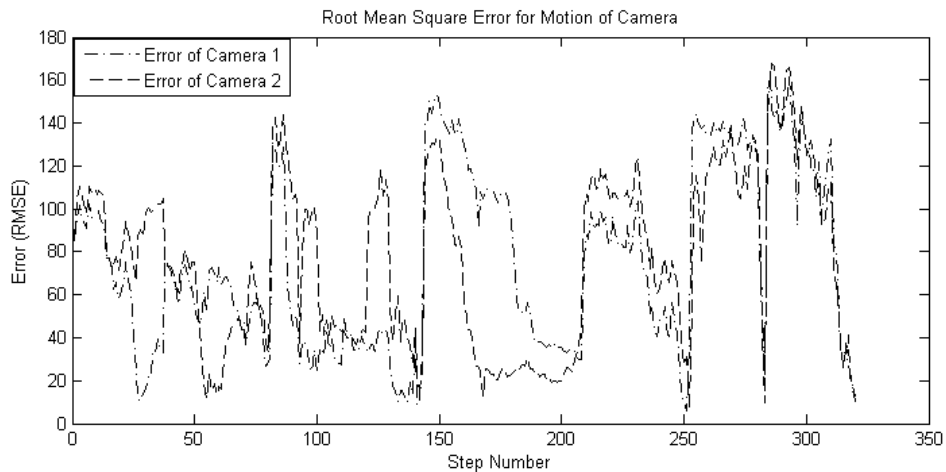
ก) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 และการก้าวเดิน      ข) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 และการก้าวเดิน



ค) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 1



ง) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 2



จ) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จากกล้องสเตอริโอ

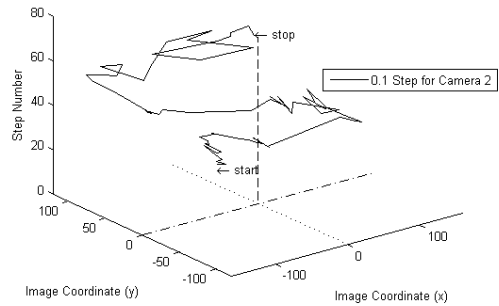
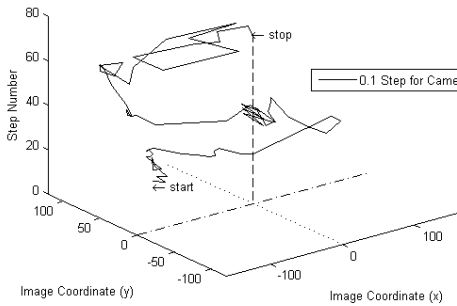
รูปที่ 5.25 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการเคลื่อนที่เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 ที่ 4 องศาอิสระ

รูปที่ 5.26 เป็นการลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการเคลื่อนที่ที่ 4 องศาอิสระและขนาดก้าวเดิน 0.1 เมื่อแสดงในมุมมองต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้ รูป ก) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ค) และรูป ง) แสดงถึงการขับเคลื่อนแขนกลให้ลู่เข้าหาเป้าหมาย โดยการเคลื่อนที่จะดำเนินไปเรื่อยๆ เพื่อเข้าหาเป้าหมายที่พบในภาพทั้งสอง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าเทคนิควิธีการในการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอนี้ทำให้หุ่นยนต์แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ลู่เข้าสู่จุดที่ต้องการ รูป จ) แสดงถึงค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จะเห็นได้ว่าการก้าวเดินต่าง ๆ นั้นจะมีค่าที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ค่าที่ลดลงนี้บ่งบอกถึงการลู่เข้าหาเป้าหมายของแขนกล ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันนั้นคือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุ ถ้าดูจากรูปที่ 5.26 จะเห็นได้ว่าวัตถุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหลายครั้ง แต่ก็ยังสามารถที่จะลู่เข้าหาเป้าหมายได้เสมอ

จะสังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายทั้งในรูปที่ 5.25 และ 5.26 นั้นจะต่างกัน เฉพาะขนาดของการก้าวเดิน โดยในรูปที่ 5.25 นั้นจะใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.05 และรูปที่ 5.26 จะใช้ขนาดของการก้าวเดิน 0.1 ซึ่งถ้าพิจารณาถึงจำนวนของการก้าวเดิน จะเห็นได้ว่าขนาดของการก้าวเดินที่ 0.1 นั้นจะสามารถเข้าหีบจับวัตถุได้รวดเร็วกว่าโดยใช้จำนวนของการก้าวเดินที่

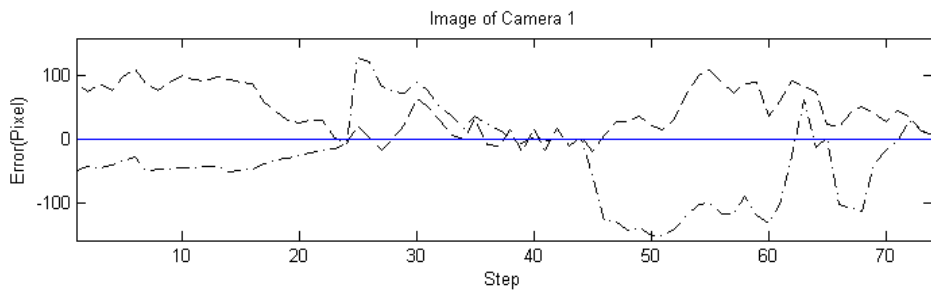


สิ้นกว่าทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งการวางของวัตถุ และไม่ว่าจะเปลี่ยนตำแหน่งการวางวัตถุก็  
 ครั้งก็ยังสามารถที่จะรู้เข้าหาเป้าหมายได้เสมอ ทั้งในขนาดของการก้าวเดิน 0.05 และ 0.1

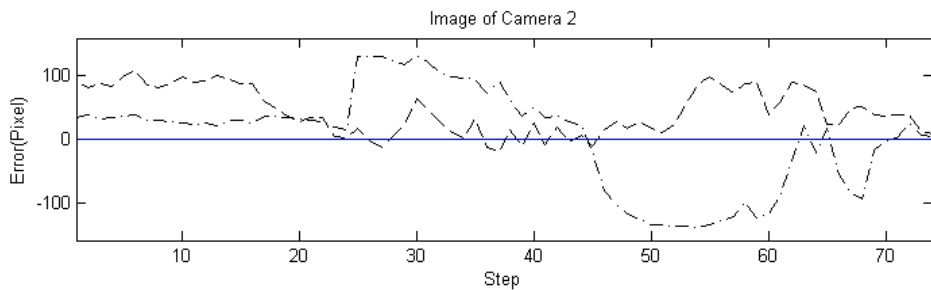


ก) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 และการก้าวเดิน

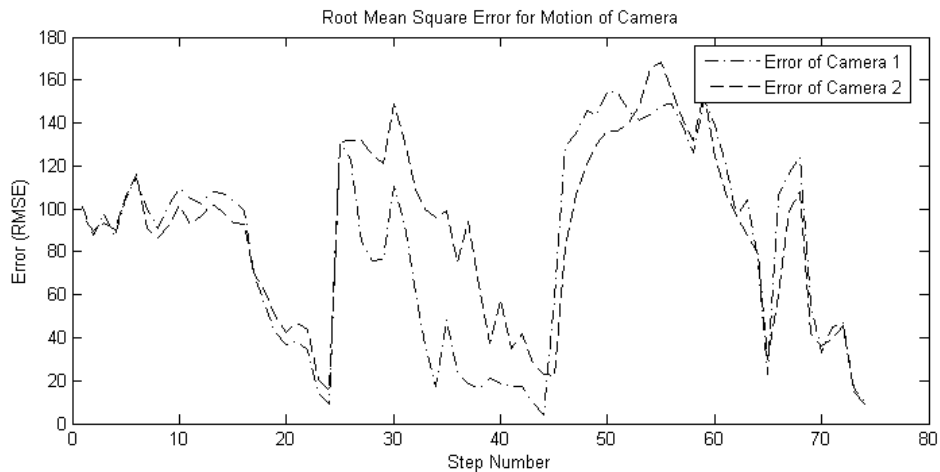
ข) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 และการก้าวเดิน



ค) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 1



ง) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 2



จ) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จากกล้องสเตอริโอ

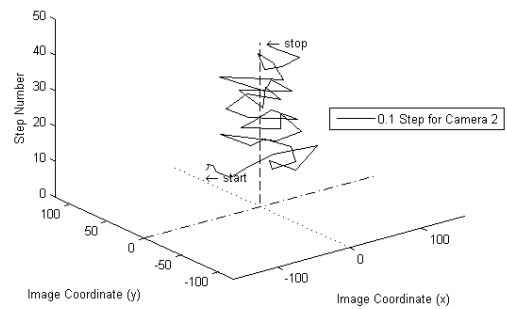
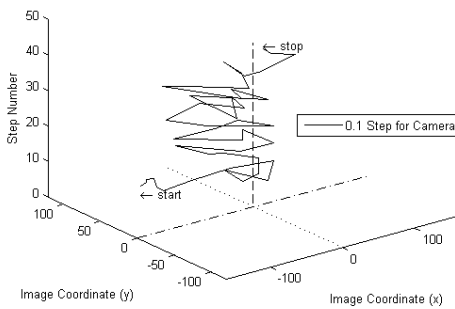
รูปที่ 5.26 การลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเปลี่ยนตำแหน่งในระหว่างการเคลื่อนที่เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ที่ 4 องศาอิสระ

### 5.3.5 การทดสอบควบคุมแขนกลเมื่อเคลื่อนที่วัตถุอย่างต่อเนื่อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเคลื่อนที่วัตถุทดสอบอย่างต่อเนื่อง โดยทดลองให้วัตถุทดสอบเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวขวางเป็นระยะทางประมาณ 10 เซนติเมตรแบบกลับไปกลับมา หลังจากที่ได้ทำการคำนวณค่าเริ่มต้นแล้ว เพื่อให้สามารถทราบถึงสมรรถนะของวิธีการโดยมีการเคลื่อนที่วัตถุทดสอบอย่างต่อเนื่องในขณะที่ทำการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ ทั้งนี้เพราะการใช้งานจริงนั้นอาจมีการเคลื่อนที่ของวัตถุสนใจจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ว่าระบบสามารถทำงานได้แม้ว่าวัตถุที่ไม่หยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่อยู่ก็ตาม หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการประมาณค่าจาโคเบียนสเตอริโอนี้สามารถที่จะลู่เข้าหาวัตถุที่สนใจได้แม้จะมีการเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งทำให้ค่าที่ประมาณในตอนเริ่มต้นผิดเพี้ยนก็ตาม

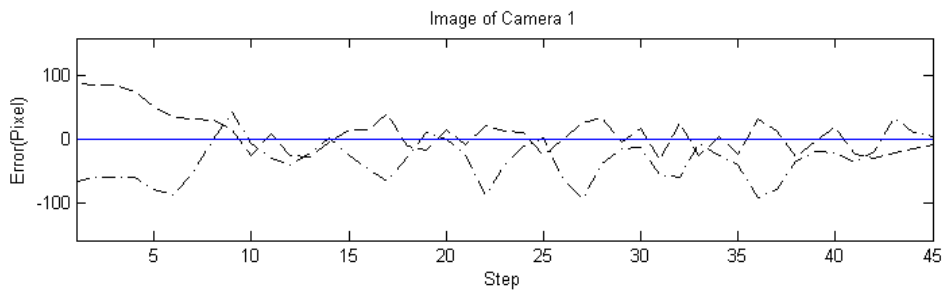
รูปที่ 5.27 เป็นการลู่เข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเคลื่อนที่ที่ 4 องศาอิสระและขนาดก้าวเดิน 0.1 เมื่อแสดงในมุมมองต่างๆ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้ รูป ก) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ข) แสดงภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 เปรียบเทียบกับการก้าวเดิน โดยจะเป็นการแสดงตำแหน่งของวัตถุภายในภาพที่ก้าวเดินต่างๆ รูป ค) และรูป ง) แสดงถึงการขับเคลื่อนแขนกลให้ลู่เข้าหาเป้าหมาย โดยการเคลื่อนที่ที่จะดำเนินไปเรื่อยๆ เพื่อเข้าหาเป้าหมายที่พบในภาพทั้งสอง ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าเทคนิควิธีการในการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอนี้ทำให้หุ่นยนต์แขนกลสามารถ

เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ลู่อู่เข้าสู่จุดที่ต้องการ รูป จ) แสดงถึงค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จะเห็นได้ว่าที่การก้าวเดินต่าง ๆ นั้นจะมีค่าที่ลดลงและเพิ่มขึ้น ค่าที่ลดลงนี้บ่งบอกถึงการลู่อู่เข้าหาเป้าหมายของแขนกล ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันนั้นคือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุ ถ้าดูจากรูปที่ 5.27 จะเห็นได้ว่าวัตถุนั้นแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างต่อเนื่อง แต่ก็ยังสามารถที่จะลู่อู่เข้าหาเป้าหมายได้เสมอ

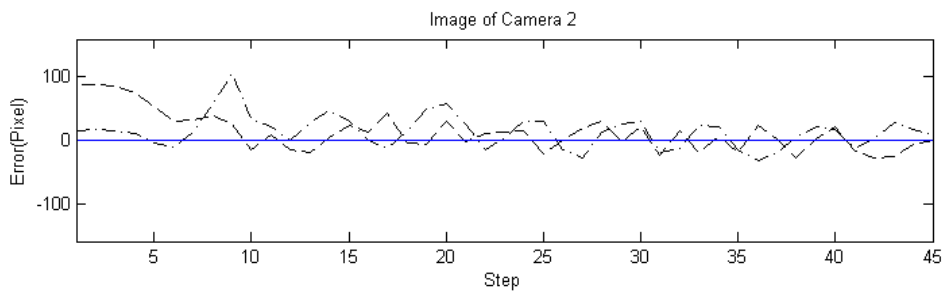


ก) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 และการก้าวเดิน

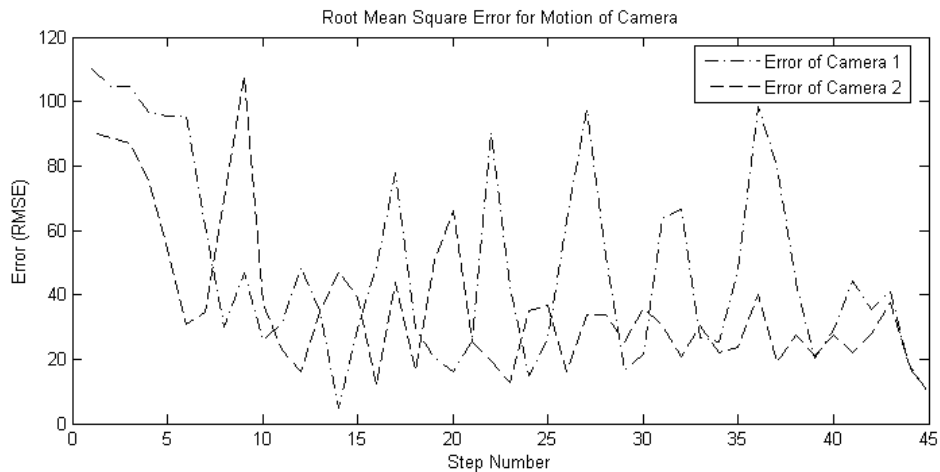
ข) ภาพที่ได้จากกล้องตัวที่ 2 และการก้าวเดิน



ค) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 1



ง) ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกนนอน และแกนนตั้ง ของภาพจากกล้องตัวที่ 2



จ) ค่าความผิดพลาดในรูปของ RMSE จากกล้องสเตอริโอ

รูปที่ 5.27 การเข้าสู่เป้าหมายของแขนกลแบบมีการเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเคลื่อนที่ เมื่อใช้ขนาดของการก้าวเดินเท่ากับ 0.1 ที่ 4 องศาอิสระ

## 5.4 สรุป

ผลการทดสอบตัวควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับหุ่นยนต์แขนกลจริงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยระบบกล้อง ตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีเมื่อช่วงก้าวเดินมีค่าที่เหมาะสม และสามารถที่จะบรรลุเป้าหมายได้ในทุกตำแหน่งของวัตถุ ทางเดินของพารามิเตอร์ควบคุมจะมีลักษณะตรงเข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งตัวควบคุมนี้ยังสามารถทำงานได้แม้ว่ารูปร่างของหุ่นยนต์จะแตกต่างกัน และ/หรือพารามิเตอร์ควบคุมมีความไวต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แตกต่างกัน โครงสร้างในการควบคุมมีลักษณะที่ง่าย และสามารถใช้กับหุ่นยนต์ได้หลายประเภทโดยไม่ต้องปรับแต่งเพิ่มเติม การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอนี้สามารถนำไปใช้จริงกับหุ่นยนต์แบบต่างๆได้ง่าย ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องปรับเทียบพารามิเตอร์ก่อนการใช้งาน วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับชุดควบคุมหุ่นยนต์ได้เนื่องจากมีพื้นฐานอยู่บนการควบคุมแบบตำแหน่ง

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมแขนกลซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนสูง วิธีที่นำเสนอจะเป็นการตัดแปลงการควบคุมแขนกล ด้วยการควบคุมแบบวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัต วิธีการควบคุมจะอาศัยการปรับค่าแบบอัตโนมัติ และนำข้อมูลนี้ไปใช้ควบคุมให้พารามิเตอร์ให้ผู้ใช้หาเป้าหมายที่ต้องการ วิธีการนี้ต้องการการคำนวณประมวลผลด้วยความเร็วสูงมากกว่าการควบคุมแบบคลาสสิกหรือแบบพีไอดี แต่การประมวลผลด้วยความเร็วสูงก็ไม่ใช่ปัญหาสำคัญในขณะนี้ เพราะปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะสูงมากและราคาไม่แพง จุดเด่นของวิธีการควบคุมในงานวิจัยนี้คือตัวควบคุมจะมีโครงสร้างที่ง่ายแม้ว่าระบบจะมีความซับซ้อนมาก โครงสร้างที่ง่ายและไม่มีพารามิเตอร์ของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องนี้ ทำให้ตัวควบคุมสามารถจัดการกับความซับซ้อนของระบบได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุมจะทำการประมาณค่าทั้งหมดและนำมาควบคุมระบบอย่างถูกต้อง

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการควบคุมในงานวิจัยนี้ กับวิธีการควบคุมระบบแบบไม่เชิงเส้นในปัจจุบัน จะพบว่าวิธีการควบคุมระบบแบบไม่เชิงเส้นมักจะต้องมีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอยู่ในตัวควบคุมในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ในทางทฤษฎี ถ้าสมการของระบบนี้มีความแม่นยำมาก การควบคุมก็จะเป็นไปตามที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้น การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความซับซ้อนสูง (เช่นระบบของหุ่นยนต์) ที่มีความแม่นยำไม่ใช่เรื่องง่าย โดยเฉพาะกับระบบที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จำนวนมาก สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่แม่นยำนี้อาจทำให้ผลลัพธ์ของการควบคุมต่างไปจากที่ออกแบบมา แนวทางหนึ่งในการจัดการกับปัญหานี้คือ การออกแบบระบบปรับเทียบเพื่อให้ได้สมการของระบบที่แม่นยำ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้มีจุดอ่อนคือต้องมีโครงสร้างของระบบที่ถูกต้อง และตัววิธีการเองก็มีความยุ่งยาก ซับซ้อน และทำงานได้เฉพาะกับระบบที่ออกแบบไว้เท่านั้น

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือสามารถออกแบบวิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมหุ่นยนต์แขนกล ได้ด้วยการควบคุมผ่านพารามิเตอร์รูปภาพ ซึ่งหุ่นยนต์แขนกลนี้เป็นระบบทางกลที่มีความซับซ้อนสูงและประกอบด้วยพารามิเตอร์มากมายซึ่งรวมถึงความยาวของแขนในข้อต่อต่างๆ ประเภทของข้อต่อ และมีความอิสระมาก นอกจากนี้แขนกลยังเกี่ยวข้องกับแรงเสียดทาน และ

อาจจะมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสายพานภายในตัวแกนกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อ หรืออาจจะมีแรงโน้มถ่วงซึ่งทำให้มีอันดับของความไม่เชิงเส้นเพิ่มขึ้นไปอีก รวมถึงระบบกลไกเอง ก็มีพารามิเตอร์จำนวนมาก ทั้งความยาวโพกัส ความไวต่อแสง รวมถึงตำแหน่งของกลไกเทียบกับ ตัวแกนกล ความซับซ้อนของพารามิเตอร์และความไม่เชิงเส้นของระบบทำให้วิธีการควบคุมที่มี พื้นฐานอยู่บนสมการทางคณิตศาสตร์เป็นไปได้ยาก

วิธีการควบคุมแกนกลด้วยระบบวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอนี้ได้ แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นต่างๆในหัวข้อของการทดสอบควบคุมแกนกลและการวิเคราะห์ผลการ ทดสอบ ซึ่งวิธีการนี้นอกจากจะมีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถจัดการกับระบบที่มีความซับซ้อนสูง แล้ว วิธีการนี้ยังสามารถที่จะนำไปใช้กับแกนกลแบบใดก็ได้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การควบคุมแกนกลที่อาศัยข้อมูลจากภาพและข้อมูลการเคลื่อนที่ของข้อ ต่อเท่านั้น จึงได้ใช้การควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอ ที่ซึ่งเป็นการพัฒนาอีกขั้นหนึ่ง ของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพ ทำให้สามารถทำงานได้โดยมีพารามิเตอร์ที่จำกัดได้อย่าง มีประสิทธิภาพ และได้มีการศึกษาถึงลักษณะในการเคลื่อนที่ของแกนกล การรับ-ส่งข้อมูลทั้งจาก แกนกล กล้อง และคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงการสร้าง โปรแกรมเพื่อทดสอบที่จำเป็นจะต้องสร้าง เพื่อให้สามารถที่จะทดสอบวิธีการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

ผลการทดสอบตัวควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับหุ่นยนต์แกนกลจริงแสดง ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยระบบกลไก ตัวควบคุม สามารถทำงานได้ดีเมื่อช่วงก้าวเดินมีค่าที่เหมาะสม และสามารถที่จะบรรลุเป้าหมายได้ในทุก ตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งตัวควบคุมนี้ยังสามารถทำงานได้แม้ว่ารูปร่างของหุ่นยนต์จะแตกต่างกัน และ/หรือพารามิเตอร์ควบคุมมีความไวต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แตกต่างกัน โครงสร้างในการ ควบคุมมีลักษณะที่ง่าย และสามารถใช้กับหุ่นยนต์ได้หลายประเภทโดยไม่ต้องปรับแต่งเพิ่มเติม วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับชุดควบคุมหุ่นยนต์ได้เนื่องจากมีพื้นฐานอยู่บนการ ควบคุมแบบตำแหน่ง

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การควบคุมแกนกลด้วยวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอแบบพลวัตนี้ ได้ แสดงถึงศักยภาพในการควบคุมแกนกลในการลู่เข้าหาเป้าหมายรูปแบบหนึ่ง อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ ใช้เป็นการประยุกต์ขั้นพื้นฐานเท่านั้น ซึ่งสามารถทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้มีศักยภาพยิ่งขึ้น ได้ อีก ตัวอย่างเช่น

### การปรับช่วงในการก้าวเดินแบบอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้ เน้นที่การหาวิธีการใหม่ในการควบคุมแบบวิซวลเซอร์โว โดยอาศัยพารามิเตอร์รูปภาพ วิธีการที่นำเสนอแม้ว่าจะทำงานได้ดี แต่ก็ยังสามารถที่จะปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ช่วงในการก้าวเดินแบบคงที่ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมความแม่นยำของจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อต้องการต้องการให้การก้าวเดินเร็วขึ้น อาจใช้ช่วงในการก้าวเดินแบบไม่คงที่ แต่ปรับเปลี่ยนไปตามค่าความผิดพลาดที่เหลืออยู่ คือเมื่อค่าความผิดพลาดมาก อาจไม่จำเป็นต้องให้ค่าจาโคเบียนรูปภาพแบบสเตอริโอมีความแม่นยำสูงนัก ก็อาจจะใช้ช่วงในการก้าวเดินที่มีขนาดมาก ซึ่งทำให้การก้าวเดินมีความรวดเร็วแต่ไม่แม่นยำ แต่ถ้าค่าความผิดพลาดน้อย ก็อาจจะใช้ช่วงในการก้าวเดินที่มีขนาดลดลง เพื่อต้องการให้ระบบมีความแม่นยำที่สูงขึ้นแต่ก็ทำให้ระบบช้าลงไปด้วย แนวคิดนี้จะเหมือนกับการนำการปรับช่วงในการก้าวเดินในบทที่ห้า มาปรับอย่างต่อเนื่อง

### ลดการสั่นในขณะเคลื่อนที่ของแขนกล

การควบคุมแขนกลในงานวิจัยนี้ ได้ทำการควบคุมแขนกลโดยตรงไม่ผ่านตัวควบคุมใดๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของแขนกลในขณะทำงาน วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการสั่น คือการใช้ตัวควบคุมเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เช่นการใส่ตัวควบคุม PID เป็นต้น ซึ่งการสั่นของแขนกลนั้นมีผลโดยตรงกับการมองเห็นของกล้อง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งกล้องไว้ที่ส่วนปลายของแขนกล ดังนั้นการลดผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่นดังกล่าว จะทำให้ระบบควบคุมโดยใช้จาโคเบียนสเตอริโอนี้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้นได้

### การทดสอบวิธีการควบคุมด้วยวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอกับระบบอื่นๆ

การควบคุมด้วยวิซวลเซอร์โวโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอในงานวิจัยนี้ เหมาะสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนสูง และเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จำนวนมาก ซึ่งมีความอิสระของระบบมากกว่าหนึ่ง แขนกลเป็นตัวอย่างหนึ่งของระบบที่กล่าวมานี้ อาจนำเทคนิคการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอริโอนี้ไปใช้กับระบบพลศาสตร์อื่น เช่นระบบขาหรือหัวของหุ่นยนต์ เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- Hill, J., Park, W.T. (1979). **Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera**. Proceedings of the 9<sup>th</sup> ISIR: 233-246.
- Weiss, L.E., Sanderson, A.C., Neuman, C.P. (1984). **Dynamic Visual Servo Control of Robots: an Adaptive Image-Based Approach**. **Robotics and Automation**. Proceedings. 1985 IEEE International Conference: 662-668.
- Weiss, L.E., Sanderson, A.C., Neuman, C.P. (1987). **Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback**. IEEE Journal on Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 5: 404-417.
- Craig, J.J., (1989). **Introduction to ROBOTICS: mechanics and control**, Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- Kabuka, M., McVey, E., Shironoshita, P. (1998). **An Adaptive Approach to Video Tracking**. IEEE Journal on Robotic and Automation, Vol. 4, No. 2.
- Feddema, J.T., Lee, C.S.G., Mitchell, O.R. (1991). **Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control**. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7: 31-47.
- Corke, P.I., Good, M.C.(1996). **Dynamic Effects in Visual Closed-Loop Systems**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.
- Wilson, W.J., Williams, H.C.C., Bell, G.S. (1996). **Relative End-Effector Control Using Cartesian Position Based Visual Servoing**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.
- Hashimoto, K., Ebine, T., Kimura, H. (1996). **Visual Servoing with Hand-Eye Manipulation Optimal Control Approach**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.
- Khadraoui, D., Motyl, G.M.P., Gallice, J., Chaumette, F. (1996). **Visual Servoing in Robotics Scheme Using a Camera/Laser-Stripe Sensor**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.



- Rafale K. (1996). **Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.
- Corke, P.I., Hutchinson, S., Hager, G. (1996). **A Tutorial on Visual Servo Control**. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 12, No. 5.
- Sutanto, H., Sharma, R., Varma, V. (1997). **Image Based Autodocking without Calibration**. Proceedings of the 1997 IEEE International Conf. on Robotics and Automation
- Sun, L., Doeschner Ch. (1999). **Visual Servo Dynamics for Robotics Based on an Extended Kohonen Network**. Proceedings of the 1999 IEEE SMC'99 Conf., Vol.2: 818-823.
- Zekharov, A., Halász, S. (1999). **Genetic Algorithm Based Identification Method for a Robot Arm**. Proceedings of ISIE'99, Vol. 3: 1014-1019.
- Flandin, G.,Chaumette, F., Marchand, E. (2000). **Eye-in-hand/Eye-to-hand Cooperation for Visual Servoing**. Proceedings of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation: 2741-2746.
- Yang, Y.X., Liu, D., Liu, H. (2002). **Robot Self-Learning Visual Servoing Algorithm Using Neural Networks**. Proceedings of the Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics: 739-742.
- Liu, H., Liu, D., Yang, Y.X. (2002). **Research of Real Time Robot Visual Servoing Based on Genetic Algorithm**. Proceedings of the Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics: 87-90.
- Elena, M., Cristiano, M., Damiano, F., Bonfè, M. (2003). **Variable structure PID Controller for cooperative eye-in-hand/eye-to-hand Visual Servoing**. Proceedings of the 2003 IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation: 989-994.
- Gonçalves, P.J.S., Pinto J.R.C. (2003). **Dynamic Visual Servoing of Robotic Manipulators**. Proceedings of EIFA'03, Vol. 2:560-565.
- Shen, X.J., Pan, J.M. (2003). **A Simple Adaptive Control for Visual Servoing**. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics: 976-979.
- Gonçalves, P.J.S., Pinto J.R.C. (2003). **An Experimental Testbed for Visual Servo Control of Robotic Manipulators**. Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference. Vol. 2: 377 – 382.

ภาคผนวก ก  
การประมวลผลภาพ

## ก.1 บทนำ

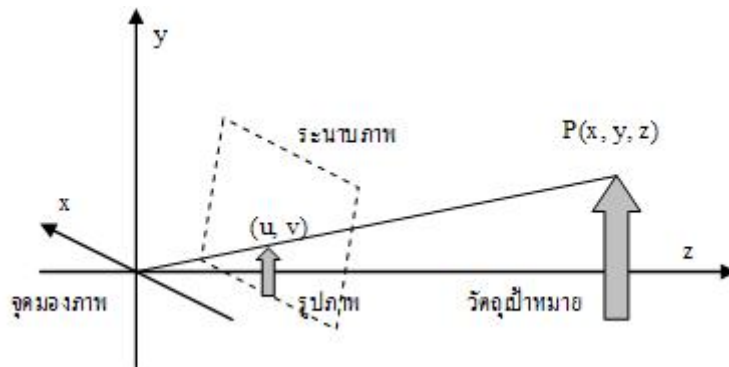
ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการนำกล้อง มาใช้ในการป้อนกลับเพื่อควบคุมขับเคลื่อนแขนกล ระบบกล้องจะมีจุดเด่นตรงที่เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้โดยไม่ต้องสัมผัสชิ้นงาน มีความยืดหยุ่นสูง และเหมาะสำหรับใช้งานในสภาพแวดล้อมหรือตำแหน่งของวัตถุที่ไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามระบบกล้องก็มีข้อเสียคือ มีความละเอียดต่ำกว่าตัวตรวจรู้แบบอื่นๆ ทำการเปรียบเทียบได้ยาก และมีความถี่ในการตรวจวัดต่ำ

ระบบที่ใช้กล้องในการป้อนกลับจะมีความซับซ้อนกว่าระบบโดยทั่วไป เนื่องจากระบบกล้องจะมีความถี่ในการวัดที่ต่ำ และข้อมูลที่ได้มีความล่าช้ากว่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ปัญหาดังกล่าวจะทำให้จำกัดระบบควบคุมที่ใช้ระบบกล้องเฉพาะกับงานที่มีการเคลื่อนที่ไม่เร็วมากนัก กล้องในทางการค้าโดยทั่วไปจะมีอัตราในการบันทึกภาพ 60 ภาพต่อวินาที และจะมีความละเอียด 480 x 512 จุดสี ระบบกล้องที่มีความเร็วและความละเอียดสูงกว่านี้จะมีราคาที่สูงขึ้นมาก

## ก.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกล้อง ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุบนแกนอ้างอิงกับตำแหน่งของวัตถุที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรือบนภาพที่บันทึกได้จากกล้อง กล้องจะมีเลนส์ที่ฉายวัตถุจริง 3 มิติมาปรากฏเป็นรูป 2 มิติบนฉากรับภาพ ลักษณะการฉายภาพแบบนี้จะทำให้ข้อมูลความลึกของวัตถุหายไป และตำแหน่งบนภาพก็จะสัมพันธ์กับเส้นทางเดินแสงใน 3 มิติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลอื่นประกอบ เพื่อระบุตำแหน่งใน 3 มิติของจุดๆหนึ่งในภาพ ข้อมูลนี้อาจมาจากกล้องหลายตัวหรือใช้กล้องตัวเดียวแต่ถ่ายหลายๆมุมมอง หรืออาศัยลักษณะรูปร่างของวัตถุที่ทราบมาก่อนล่วงหน้ามาพิจารณาประกอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุจริงกับตำแหน่งของวัตถุบนภาพที่บันทึกได้ที่ใช้กัน โดยทั่วไปมี 3 แบบจำลองคือ แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติ (Perspective projection) แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด (Scaled Orthographic projection) และแบบจำลองสัมพรรค (Affine projection) โดยต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองทั้งสามแบบสั้นๆ

สำหรับแบบจำลองทั้งสามที่จะกล่าวถึง กำหนดให้ฉากรับภาพอยู่บนระนาบที่ขนานกับระนาบ  $xy$  และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเป็นระยะทาง  $\lambda$  (ระยะโฟกัส) ในขณะที่แกน  $z$  จะตั้งฉากกับระนาบนี้ ตำแหน่งของวัตถุบนฉากรับภาพจะถูกระบุด้วยแกน  $u$  และ  $v$  ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ ก.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์

### ก.2.1 แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติ

แบบจำลองนี้จะมีลักษณะเหมือนของจริงที่สุดโดยใช้หลักการพิจารณาทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งที่ทางเดินนี้ตัดกับฉากรับภาพ จุด  ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$  ซึ่งมีตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิงของกล้อง โดยจะโปรเจกต์ลงบนฉากรับภาพที่ตำแหน่ง  $\mathbf{p} = [u, v]^T$  ตามสมการ

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{ก.1})$$

### ก.2.2 แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด

แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นซึ่งแม้ว่าจะมีความสมบูรณ์แต่ก็มีความซับซ้อน ในบางกรณีอาจประมาณความสัมพันธ์ให้เป็นแบบเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองมีโครงสร้างที่ง่ายขึ้น ในแบบจำลองนี้ จุด  ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$  จะได้จาก

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่  $s$  คือตัวปรับลดที่มีค่าคงที่

แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาดนี้จะมีความแม่นยำในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ มากำน้อย เมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างกล้องกับฉากรับภาพ

### ก.2.3 แบบจำลองแอฟฟิน

เป็นแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ในการประมาณภาพฉายทัศนมิติในอีกลักษณะหนึ่ง หรืออาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาดก็เป็นแบบจำลองแอฟฟินแบบหนึ่ง แบบจำลองแอฟฟินเป็นเพียงการประมาณเชิงเส้นโดยไม่คำนึงถึงลักษณะในการบันทึกภาพ จุด  ${}^c\mathbf{P} = [x, y, z]^T$  จะได้จาก

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{A} {}^c\mathbf{P} + \mathbf{c} \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่  $\mathbf{A}$  คือเมตริกซ์ขนาด  $2 \times 3$  และ  $\mathbf{c}$  เป็นเวกเตอร์  $1 \times 2$

แบบจำลองแอฟฟินจะรวมทั้งโครงสร้างภายใน (เช่นเลนส์) และโครงสร้างภายนอก (เช่นตำแหน่งของกล้อง) ของกล้อง และเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณหาค่า  $\mathbf{A}$  และ  $\mathbf{c}$  ได้อย่างง่ายโดยใช้วิธีถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Technique) และจะช่วยให้สามารถปรับเทียบกล้องได้อย่างง่าย

### ก.3 การประมวลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ

ในส่วนนี้จะอธิบายขั้นตอนในการหาตำแหน่งของวัตถุจากรูปภาพอย่างละเอียด โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การแยกวัตถุเป้าหมายออกจากสิ่งแวดล้อม และการหาจุดศูนย์กลางรวมมวลของวัตถุ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การแยกวัตถุเป้าหมายออกจากสิ่งแวดล้อม วัตถุที่ใช้เป็นเป้าหมายในการค้นหานั้นจะใช้วัตถุที่มีลักษณะเป็นสีเดียว ซึ่งจะมีช่วงสีของ R G และ B แตกต่างจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่อยู่ในภาพ จากนั้นทำการหาค่าช่วงสีของวัตถุเป้าหมายว่ามีช่วงสีของ R G และ B อยู่ในช่วงใด หลังจากนั้นทำการอ่านค่าสีภายในภาพทุกๆจุดสี แล้วนำแต่ละจุดสีที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าของช่วงสีของวัตถุเป้าหมายที่สนใจ

การหาจุดศูนย์กลางรวมมวลของวัตถุ หลังจากได้ทำการแยกวัตถุเป้าหมายออกจาก สิ่งแวดล้อมแล้ว ทำการบันทึกผลรวมตำแหน่งที่พบจุดที่คาดว่าเป็นวัตถุเป้าหมายโดยแยกรวมเป็นผลรวมตามแนวตั้งและแนวนอนพร้อมทั้งเก็บจำนวนจุดที่พบ หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนในการกำหนดว่าวัตถุเป้าหมายดังกล่าวมีจุดศูนย์กลางรวมมวลอยู่ที่ใดในตำแหน่งของภาพโดยสามารถบ่งบอกพิกัดได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอนโดยอาศัยสมการดังนี้

$$X_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_i}{n} \quad (\text{ก.4})$$

และ

$$Y_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} Y_i}{n} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่

$X_c$  = จุดศูนย์กลางรวมมวลตามแนวนอน

$X_i$  = จุดที่พบช่วงสีของวัตถุเป้าหมายตามแนวนอน

$Y_c$  = จุดศูนย์กลางรวมมวลตามแนวตั้ง

$Y_i$  = จุดที่พบช่วงสีของวัตถุเป้าหมายตามแนวตั้ง

$n$  = จำนวนจุดสีของวัตถุเป้าหมายที่พบในภาพ

ภาคผนวก ข

รายละเอียดข้อมูลการทดสอบโปรแกรมกับหุ่นยนต์แขนกล

ภาคผนวก ข. แสดงถึงรายละเอียดข้อมูลจากการทดลองกับหุ่นยนต์แขนกลทดสอบ SCORBOT®-ER III ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC ซึ่งเป็นแขนกลแบบข้อต่อ (Articulated) ที่มี 5 ข้อต่อและ 1 มือจับยึด ในการทดลองประกอบด้วย

- ผลการทดลองการควบคุมแขนกลโดยใช้การประมาณจาโคเบียในรูปแบบพลวัต ด้วยค่าองศาอิสระต่างๆ และค่าขนาดของการก้าวเดินที่ต่างกัน ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5

- ผลการทดลองการควบคุมแขนกลโดยใช้การประมาณจาโคเบียในรูปแบบสเตอริโอแบบพลวัต ด้วยค่าองศาอิสระต่างๆ และค่าขนาดของการก้าวเดินที่ต่างกัน รวมทั้งผลของการควบคุมเมื่อวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 5



### ข.1 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 1 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 1 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |     |     |     |
|-------------|---------------------|-----|-----|-----|
|             | 0.05                | 0.1 | 0.3 | 0.5 |
|             | x                   | x   | x   | x   |
| 1           | 106                 | 109 | 111 | 118 |
| 2           | 103                 | 101 | 73  | 42  |
| 3           | 94                  | 86  | 48  | 18  |
| 4           | 90                  | 77  | 31  | 10  |
| 5           | 81                  | 70  | 27  | 1   |
| 6           | 79                  | 63  | 7   |     |
| 7           | 74                  | 55  | 6   |     |
| 8           | 70                  | 50  | 4   |     |
| 9           | 65                  | 44  | 1   |     |
| 10          | 61                  | 39  |     |     |
| 11          | 59                  | 37  |     |     |
| 12          | 56                  | 31  |     |     |
| 13          | 53                  | 30  |     |     |
| 14          | 51                  | 21  |     |     |
| 15          | 48                  | 18  |     |     |
| 16          | 47                  | 17  |     |     |
| 17          | 41                  | 15  |     |     |
| 18          | 38                  | 13  |     |     |
| 19          | 36                  | 12  |     |     |
| 20          |                     | 11  |     |     |
| 21          |                     | 10  |     |     |
| 22          |                     | 6   |     |     |

## ข.2 ผลการทดลองการถ่วงเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |      |      |     |
|-------------|---------------------|------|------|-----|
|             | 0.02                | 0.03 | 0.05 | 0.1 |
|             | x                   | x    | x    | x   |
| 1           | 75                  | 94   | 97   | 96  |
| 2           | 63                  | 93   | 105  | 111 |
| 3           | 77                  | 94   | 97   | 99  |
| 4           | 69                  | 106  | 82   | 76  |
| 5           | 59                  | 98   | 81   | 53  |
| 6           | 63                  | 104  | 63   | 29  |
| 7           | 64                  | 98   | 55   | -1  |
| 8           | 69                  | 89   | 48   |     |
| 9           | 68                  | 88   | 40   |     |
| 10          | 69                  | 86   | 33   |     |
| 11          | 64                  | 74   | 23   |     |
| 12          | 62                  | 69   | 9    |     |
| 13          | 57                  | 63   | -1   |     |
| 14          | 49                  | 57   |      |     |
| 15          | 48                  | 51   |      |     |
| 16          | 48                  | 41   |      |     |
| 17          | 42                  | 40   |      |     |
| 18          | 36                  | 31   |      |     |
| 19          | 41                  | 29   |      |     |
| 20          | 38                  | 26   |      |     |
| 21          | 36                  | 24   |      |     |
| 22          | 31                  | 23   |      |     |
| 23          | 27                  | 21   |      |     |
| 24          | 17                  | 14   |      |     |
| 25          | 18                  | 15   |      |     |

## ข.2 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ (ต่อ)

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 2 องศาอิสระ (ต่อ)

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |      |      |     |
|-------------|---------------------|------|------|-----|
|             | 0.02                | 0.03 | 0.05 | 0.1 |
|             | x                   | x    | x    | x   |
| 26          | 15                  | 8    |      |     |
| 27          | 12                  | 3    |      |     |
| 28          | 4                   |      |      |     |

### ข.3 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$  และ  $-10 < y < 10$

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |    |      |    |      |    |     |     |
|-------------|---------------------|----|------|----|------|----|-----|-----|
|             | 0.02                |    | 0.03 |    | 0.05 |    | 0.1 |     |
|             | x                   | y  | x    | y  | x    | y  | x   | y   |
| 1           | -66                 | 82 | -68  | 89 | -74  | 86 | -66 | 84  |
| 2           | -65                 | 80 | -67  | 82 | -66  | 80 | -55 | 68  |
| 3           | -63                 | 82 | -67  | 76 | -57  | 79 | -45 | 49  |
| 4           | -60                 | 73 | -59  | 79 | -50  | 69 | -33 | 28  |
| 5           | -61                 | 74 | -51  | 80 | -39  | 71 | -19 | 19  |
| 6           | -62                 | 62 | -43  | 69 | -34  | 62 | -6  | 10  |
| 7           | -58                 | 63 | -39  | 77 | -29  | 56 | -2  | 19  |
| 8           | -54                 | 61 | -32  | 76 | -27  | 44 | -2  | 8   |
| 9           | -51                 | 67 | -26  | 67 | -22  | 37 | 10  | -13 |
| 10          | -46                 | 62 | -20  | 63 | -17  | 35 | -5  | 7   |
| 11          | -41                 | 65 | -12  | 74 | -15  | 32 | 11  | -16 |
| 12          | -43                 | 59 | -5   | 55 | -11  | 20 | -3  | 3   |
| 13          | -39                 | 56 | 2    | 40 | -5   | 21 | -66 | 86  |
| 14          | -36                 | 49 | 8    | 51 | -1   | 12 | -56 | 69  |
| 15          | -31                 | 50 | 6    | 45 | 2    | 2  | -48 | 45  |
| 16          | -30                 | 44 | 8    | 51 |      |    | -34 | 23  |
| 17          | -28                 | 38 | 7    | 42 |      |    | -5  | 20  |
| 18          | -26                 | 38 | 4    | 37 |      |    | 4   | -2  |
| 19          | -26                 | 35 | 4    | 30 |      |    |     |     |
| 20          | -28                 | 24 | 3    | 25 |      |    |     |     |
| 21          | -25                 | 35 | 2    | 18 |      |    |     |     |
| 22          | -25                 | 22 | 1    | 16 |      |    |     |     |
| 23          | -26                 | 19 | 0    | 9  |      |    |     |     |
| 24          | -22                 | 28 | -2   | 2  |      |    |     |     |
| 25          | -28                 | 5  |      |    |      |    |     |     |

### ข.3 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ (ต่อ)

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$  และ  $-10 < y < 10$

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 3 องศาอิสระ (ต่อ)

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |    |      |   |      |   |     |   |
|-------------|---------------------|----|------|---|------|---|-----|---|
|             | 0.02                |    | 0.03 |   | 0.05 |   | 0.1 |   |
|             | x                   | y  | x    | y | x    | y | x   | y |
| 26          | -31                 | 0  |      |   |      |   |     |   |
| 27          | -33                 | -3 |      |   |      |   |     |   |
| 28          | -30                 | 15 |      |   |      |   |     |   |
| 29          | -26                 | 15 |      |   |      |   |     |   |
| 30          | -21                 | 11 |      |   |      |   |     |   |
| 31          | -20                 | 10 |      |   |      |   |     |   |
| 32          | -17                 | 13 |      |   |      |   |     |   |
| 33          | -13                 | 17 |      |   |      |   |     |   |
| 34          | -10                 | 15 |      |   |      |   |     |   |
| 35          | -10                 | 6  |      |   |      |   |     |   |
| 36          | -5                  | 6  |      |   |      |   |     |   |
| 37          | -3                  | -3 |      |   |      |   |     |   |

#### ข.4 ผลการทดลองการถ่วงเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$  และ  $-10 < y < 10$

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |    |      |     |      |    |     |    |
|-------------|---------------------|----|------|-----|------|----|-----|----|
|             | 0.02                |    | 0.03 |     | 0.05 |    | 0.1 |    |
|             | x                   | y  | x    | y   | x    | y  | x   | y  |
| 1           | -81                 | 61 | -86  | 88  | -87  | 86 | 16  | 71 |
| 2           | -81                 | 56 | -86  | 73  | -78  | 65 | 16  | 70 |
| 3           | -82                 | 53 | -87  | 67  | -73  | 54 | 14  | 68 |
| 4           | -82                 | 55 | -87  | 80  | -72  | 68 | 26  | 48 |
| 5           | -81                 | 53 | -85  | 86  | -73  | 66 | 47  | 30 |
| 6           | -81                 | 53 | -85  | 83  | -71  | 80 | 41  | 31 |
| 7           | -80                 | 54 | -84  | 78  | -63  | 74 | 41  | 31 |
| 8           | -80                 | 58 | -83  | 81  | -69  | 69 | 32  | 39 |
| 9           | -79                 | 50 | -84  | 77  | -59  | 57 | 16  | 50 |
| 10          | -78                 | 60 | -81  | 79  | -51  | 48 | 17  | 45 |
| 11          | -79                 | 58 | -79  | 94  | -50  | 39 | 18  | 44 |
| 12          | -76                 | 52 | -76  | 103 | -50  | 39 | 56  | 33 |
| 13          | -76                 | 48 | -70  | 100 | -39  | 35 | 35  | 56 |
| 14          | -75                 | 42 | -64  | 103 | -26  | 38 | 28  | 41 |
| 15          | -72                 | 39 | -57  | 105 | -16  | 35 | 29  | 18 |
| 16          | -71                 | 47 | -51  | 108 | -12  | 20 | 15  | 5  |
| 17          | -72                 | 48 | -45  | 109 | -11  | 16 | 42  | 35 |
| 18          | -70                 | 39 | -42  | 102 | -3   | 5  | 43  | 20 |
| 19          | -67                 | 36 | -40  | 97  |      |    | 9   | 19 |
| 20          | -64                 | 29 | -38  | 93  |      |    | -15 | 13 |
| 21          | -60                 | 35 | -38  | 101 |      |    | -1  | -3 |
| 22          | -57                 | 37 | -32  | 104 |      |    |     |    |
| 23          | -53                 | 41 | -28  | 103 |      |    |     |    |
| 24          | -51                 | 31 | -18  | 97  |      |    |     |    |
| 25          | -46                 | 30 | -17  | 91  |      |    |     |    |

#### ข.4 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ (ต่อ)

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y)

เป้าหมาย :  $-10 < x < 10$  และ  $-10 < y < 10$

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพที่ 4 องศาอิสระ (ต่อ)

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |    |      |    |      |   |     |   |
|-------------|---------------------|----|------|----|------|---|-----|---|
|             | 0.02                |    | 0.03 |    | 0.05 |   | 0.1 |   |
|             | x                   | y  | x    | y  | x    | y | x   | y |
| 26          | -44                 | 24 | -17  | 89 |      |   |     |   |
| 27          | -41                 | 25 | -15  | 91 |      |   |     |   |
| 28          | -36                 | 29 | -11  | 93 |      |   |     |   |
| 29          | -32                 | 31 | -3   | 94 |      |   |     |   |
| 30          | -27                 | 34 | 5    | 91 |      |   |     |   |
| 31          | -28                 | 32 | 0    | 82 |      |   |     |   |
| 32          | -29                 | 25 | 2    | 78 |      |   |     |   |
| 33          | -26                 | 27 | 1    | 67 |      |   |     |   |
| 34          | -21                 | 23 | -2   | 57 |      |   |     |   |
| 35          | -16                 | 23 | -5   | 50 |      |   |     |   |
| 36          | -10                 | 22 | -5   | 34 |      |   |     |   |
| 37          | -6                  | 21 | -3   | 48 |      |   |     |   |
| 38          | -4                  | 30 | 1    | 43 |      |   |     |   |
| 39          | -4                  | 19 | 4    | 46 |      |   |     |   |
| 40          | -2                  | 16 | 3    | 35 |      |   |     |   |
| 41          | 2                   | 20 | 3    | 43 |      |   |     |   |
| 42          | 0                   | 21 | 3    | 45 |      |   |     |   |
| 43          | 0                   | 17 | 3    | 36 |      |   |     |   |
| 44          | -1                  | 13 | 7    | 34 |      |   |     |   |
| 45          | 1                   | 6  | 3    | 19 |      |   |     |   |
| 46          | -2                  | 4  | 2    | 26 |      |   |     |   |
| 47          |                     |    | 0    | 10 |      |   |     |   |
| 48          |                     |    | 4    | 10 |      |   |     |   |
| 49          |                     |    | -4   | 9  |      |   |     |   |

### ข.5 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอร์ไอที่ 3 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพจากกล้องตัวที่ 1 ( $x_1, y_1$ )

ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพจากกล้องตัวที่ 2 ( $x_2, y_2$ )

เป้าหมาย :  $-10 < x_1 < 10$  และ  $-10 < y_1 < 10$

$-10 < x_2 < 10$  และ  $-10 < y_2 < 10$

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอร์ไอที่ 3 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0.02                |       |       |       | 0.03  |       |       |       | 0.05  |       |       |       |
|             | $x_1$               | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $x_1$ | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $x_1$ | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ |
| 1           | -36                 | 55    | 51    | 57    | 52    | 56    | -36   | 57    | -37   | 52    | 52    | 54    |
| 2           | -35                 | 58    | 50    | 56    | 50    | 57    | -35   | 55    | -34   | 49    | 51    | 50    |
| 3           | -34                 | 54    | 50    | 55    | 48    | 55    | -35   | 56    | -31   | 45    | 49    | 48    |
| 4           | -33                 | 47    | 49    | 51    | 46    | 52    | -34   | 52    | -33   | 24    | 46    | 29    |
| 5           | -32                 | 46    | 49    | 51    | 42    | 53    | -34   | 56    | -30   | 20    | 45    | 27    |
| 6           | -30                 | 55    | 49    | 53    | 43    | 54    | -32   | 56    | -26   | 21    | 44    | 26    |
| 7           | -29                 | 56    | 46    | 56    | 40    | 57    | -31   | 58    | -24   | 15    | 39    | 19    |
| 8           | -28                 | 55    | 46    | 58    | 36    | 70    | -31   | 71    | -18   | 20    | 41    | 24    |
| 9           | -26                 | 60    | 45    | 63    | 40    | 59    | -25   | 61    | -18   | -7    | 33    | -2    |
| 10          | -23                 | 69    | 45    | 66    | 40    | 63    | -21   | 65    | -10   | 3     | 33    | 6     |
| 11          | -22                 | 76    | 44    | 76    | 41    | 54    | -17   | 54    | -7    | -5    | 28    | 0     |
| 12          | -22                 | 66    | 44    | 62    | 32    | 38    | -19   | 37    | -2    | -8    | 20    | -7    |
| 13          | -20                 | 56    | 43    | 55    | 28    | 32    | -18   | 29    | -11   | -7    | 24    | -4    |
| 14          | -19                 | 46    | 42    | 49    | 21    | 23    | -16   | 24    | 0     | 2     | 23    | 5     |
| 15          | -16                 | 49    | 42    | 51    | 14    | 19    | -14   | 20    | -1    | 6     | 13    | 11    |
| 16          | -14                 | 54    | 41    | 55    | 5     | -16   | -19   | -15   | 11    | -6    | 0     | -10   |
| 17          | -11                 | 51    | 41    | 53    | 1     | -2    | -13   | -1    | 3     | 17    | -1    | 15    |
| 18          | -11                 | 35    | 36    | 40    | 7     | -11   | -18   | -9    | 7     | -1    | -10   | -3    |
| 19          | -9                  | 32    | 32    | 34    | -2    | -8    | -14   | -6    |       |       |       |       |
| 20          | -8                  | 16    | 28    | 26    | 12    | 12    | -14   | 14    |       |       |       |       |
| 21          | -5                  | 25    | 26    | 32    | 7     | 9     | -5    | 12    |       |       |       |       |
| 22          | -2                  | 30    | 25    | 34    | -7    | -13   | -2    | -8    |       |       |       |       |
| 23          | 1                   | 32    | 20    | 34    | -16   | -6    | 1     | -2    |       |       |       |       |





## ข.6 ผลการทดลองการเข้าสู่เป้าหมายของจาโคเบียนรูปภาพสเตอร์ไอที่ 4 องศาอิสระ

พารามิเตอร์ควบคุม : ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพจากกล้องตัวที่ 1 ( $x_1, y_1$ )

ตำแหน่งวัตถุในรูปภาพจากกล้องตัวที่ 2 ( $x_2, y_2$ )

เป้าหมาย :  $-10 < x_1 < 10$  และ  $-10 < y_1 < 10$

$-10 < x_2 < 10$  และ  $-10 < y_2 < 10$

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลของการควบคุมโดยใช้จาโคเบียนรูปภาพสเตอร์ไอที่ 4 องศาอิสระ

| Step Number | ความยาวช่วงก้าวเดิน |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 0.05                |       |       |       | 0.075 |       |       |       | 0.1   |       |       |       |
|             | $x_1$               | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $x_1$ | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ | $x_1$ | $y_1$ | $x_2$ | $y_2$ |
| 1           | -32                 | 94    | 54    | 92    | -32   | 93    | 54    | 92    | 54    | 88    | -32   | 88    |
| 2           | -31                 | 88    | 54    | 90    | -30   | 91    | 53    | 90    | 50    | 83    | -33   | 89    |
| 3           | -29                 | 90    | 55    | 92    | -29   | 87    | 52    | 85    | 52    | 74    | -29   | 76    |
| 4           | -28                 | 95    | 53    | 95    | -28   | 94    | 50    | 94    | 45    | 79    | -31   | 81    |
| 5           | -24                 | 82    | 57    | 84    | -26   | 100   | 49    | 98    | 42    | 80    | -30   | 82    |
| 6           | -18                 | 80    | 62    | 82    | -23   | 107   | 48    | 108   | 36    | 105   | -28   | 107   |
| 7           | -12                 | 70    | 69    | 71    | -21   | 114   | 44    | 114   | 29    | 116   | -28   | 118   |
| 8           | -11                 | 63    | 69    | 63    | -21   | 107   | 47    | 105   | 35    | 112   | -18   | 114   |
| 9           | -12                 | 57    | 69    | 62    | -18   | 100   | 50    | 98    | 37    | 106   | -13   | 109   |
| 10          | -9                  | 75    | 67    | 73    | -21   | 75    | 51    | 70    | 38    | 106   | -5    | 109   |
| 11          | -7                  | 84    | 66    | 82    | -22   | 55    | 50    | 60    | 34    | 87    | -9    | 91    |
| 12          | -8                  | 84    | 64    | 82    | -25   | 63    | 48    | 63    | 27    | 77    | -10   | 81    |
| 13          | -8                  | 91    | 60    | 89    | -21   | 98    | 46    | 96    | 16    | 61    | -10   | 64    |
| 14          | -9                  | 97    | 57    | 97    | -21   | 104   | 43    | 102   | 6     | 5     | -16   | 6     |
| 15          | -10                 | 85    | 59    | 85    | -19   | 102   | 44    | 102   | 6     | -20   | -24   | -16   |
| 16          | -16                 | 67    | 56    | 66    | -17   | 103   | 44    | 101   | 12    | 14    | -14   | 20    |
| 17          | -17                 | 62    | 56    | 59    | -17   | 98    | 42    | 95    | -3    | 9     | -10   | 10    |
| 18          | -17                 | 76    | 52    | 74    | -16   | 92    | 41    | 89    |       |       |       |       |
| 19          | -18                 | 80    | 53    | 72    | -17   | 69    | 38    | 67    |       |       |       |       |
| 20          | -18                 | 88    | 49    | 80    | -15   | 59    | 34    | 57    |       |       |       |       |
| 21          | -18                 | 73    | 53    | 72    | -16   | 30    | 28    | 30    |       |       |       |       |
| 22          | -17                 | 69    | 55    | 70    | -12   | 8     | 22    | 8     |       |       |       |       |
| 23          | -17                 | 58    | 56    | 56    | -2    | -16   | 20    | -18   |       |       |       |       |





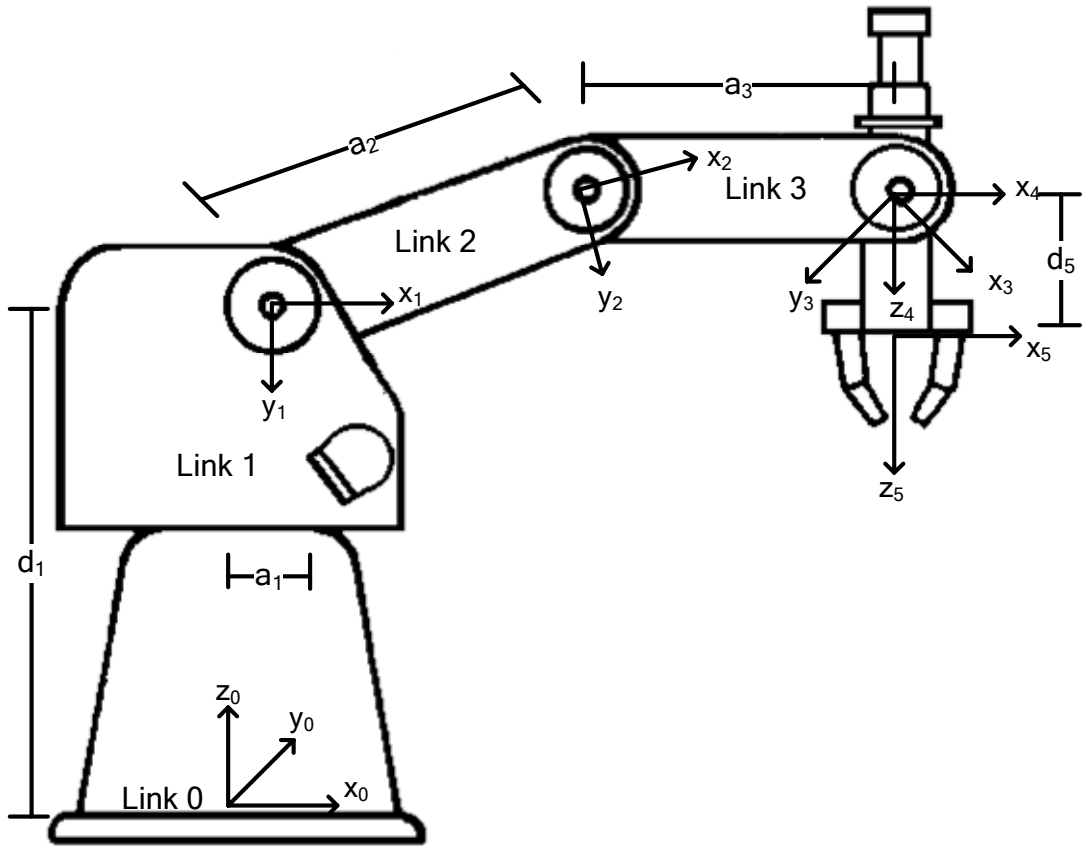


**ภาคผนวก ค**  
**แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของแขนกลทดสอบ**

## ค.1 บทนำ

ในภาคผนวกนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของแขนกลที่นำมาทดสอบ โดยในการออกแบบโครงสร้างและการควบคุมแขนกลนั้น จำเป็นจะต้องมีความเข้าใจในโมเดลพื้นฐานของแขนกล ซึ่งประกอบไปด้วย การกำหนดตำแหน่งส่วนประกอบของหุ่นยนต์และการแปลงตำแหน่งในปริภูมิสามมิติ, จลนศาสตร์ไปหน้า และจลนศาสตร์ผกผัน โดยในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของจลนศาสตร์ไปหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เพราะว่าการจะหาจลนศาสตร์ไปหน้าได้ ต้องมีความรู้ในเรื่องของการกำหนดตำแหน่งส่วนประกอบของหุ่นยนต์และการแปลงตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ และเราสามารถที่จะหาจลนศาสตร์ผกผันได้โดยง่ายจากจลนศาสตร์ไปหน้า

จลนศาสตร์ไปหน้า เป็นการคำนวณตำแหน่งพิกัดปลายของแขนกลเมื่อกำหนดค่าตำแหน่งและการวางตัวของส่วนประกอบต่างๆมาให้ โดยปกติแล้วส่วนประกอบดังกล่าวจะประกอบไปด้วยชิ้นเชื่อมต่อ (link) และข้อต่อ (joint) จลนศาสตร์เป็นการศึกษาถึงตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งและปริมาณในอันดับสูงของตัวแปรตำแหน่ง ดังนั้นในการศึกษาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์จึงเกี่ยวข้องกับเรขาคณิตและคุณสมบัติของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหุ่นยนต์ โดยในภาคผนวกนี้จะประกอบไปด้วยการศึกษาถึงตำแหน่ง และการวางตัวของปลายแขนกล (robot end-effector) ในรูปตัวแปรของข้อต่อแขนกล โดยเทียบกับฐานของตัวหุ่นยนต์



รูปที่ ค.1 การทำงานของแขนกลแบบ SCORBOT ER-III

ตารางที่ ค.1 พารามิเตอร์ของชิ้นส่วนสำหรับแขนกลแบบ SCORBOT ER-III

| Joint $i$ | $\alpha_{i-1}$ | $a_{i-1}$ | $d_i$ | $\theta_i$ |
|-----------|----------------|-----------|-------|------------|
| 1         | $-\pi/2$       | $a_1$     | $d_1$ | $\theta_1$ |
| 2         | 0              | $a_2$     | 0     | $\theta_2$ |
| 3         | 0              | $a_3$     | 0     | $\theta_3$ |
| 4         | $-\pi/2$       | 0         | 0     | $\theta_4$ |
| 5         | 0              | 0         | $d_5$ | $\theta_5$ |



รูปที่ ค.1 เป็นรูปของโครงสร้างและการกำหนดเฟรมของแขนกลที่นำมาทดสอบ ซึ่งมี 5 องศาอิสระและ 1 มือจับยึด ข้อต่อทั้งหมดยกเว้นมือจับยึดจะเป็นข้อต่อแบบหมุน (Revolute link) ในกรณีนี้มีการกำหนดให้เฟรม {3} และ {4} อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน แต่ไม่ทับกันเนื่องจากเฟรมที่ {3} นั้นจะทำหน้าที่ในการหมุนตามแนวแกน x ส่วนเฟรมที่ {4} นั้นจะทำหน้าที่หมุนตามแนวแกน z

ตารางที่ ค.1 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ของแขนกล โดย  $\alpha_i$  คือ มุมระหว่างแกน  $Z_i$  และ  $Z_{i+1}$  โดยวัดรอบแกน  $X_i$ ,  $a_i$  คือ ระยะระหว่างแกน  $Z_i$  และ  $Z_{i+1}$  โดยวัดในทิศทางของแกน  $X_i$ ,  $d_i$  คือ ระยะระหว่างแกน  $X_{i-1}$  และ  $X_i$  โดยวัดในทิศทางของแกน  $Z_i$  และ  $\theta_i$  คือ มุมระหว่างแกน  $X_{i-1}$  และ  $X_i$  โดยวัดรอบแกน  $Z_i$

หลังจากที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนแล้ว สามารถที่จะคำนวณหาการแปลงระหว่างเฟรม และนำการแปลงดังกล่าวไปรวมกันเพื่อหาเป็นการแปลงรวม หรือเป็นการแปลงระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับตำแหน่งฐานได้โดยใช้สมการการแปลงที่เรียกว่า Transformation operator ในวิธีการของ Denavit-Hertenberg

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.1})$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.2})$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.3})$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.4})$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.5)$$

นำสมการที่ (ก.2) จนถึง สมการที่ (ก.4) มารวมกัน โดยใช้รูปแบบการรวมกันของการแปลงหลายต่อ (Compound Transformation) ตามสมการ  ${}^1T_4 = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$  จะได้

$${}^1T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{234} & 0 & -\sin \theta_{234} & a_3 \cos \theta_{23} + a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_{234} & 0 & \cos \theta_{234} & a_3 \sin \theta_{23} + a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.6)$$

เมื่อ  $\theta_{ij} = (\theta_i + \theta_j)$  และ  $\theta_{ijk} = (\theta_i + \theta_j + \theta_k)$

ในทำนองเดียวกัน สามารถหา  ${}^0T_5$  ได้จากสมการ  ${}^0T_5 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5$  คือ

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} U_x & V_x & W_x & q_x \\ U_y & V_y & W_y & q_y \\ U_z & V_z & W_z & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.7)$$

เมื่อ  $U_x = \cos \theta_1 \cos \theta_{234} \cos \theta_5 + \sin \theta_1 \sin \theta_5$

$$U_y = \sin \theta_1 \cos \theta_{234} \cos \theta_5 - \cos \theta_1 \sin \theta_5$$

$$U_z = -\sin \theta_{234} \cos \theta_5$$

$$V_x = -\cos \theta_1 \cos \theta_{234} \sin \theta_5 + \sin \theta_1 \cos \theta_5$$

$$V_y = -\sin \theta_1 \cos \theta_{234} \sin \theta_5 - \cos \theta_1 \cos \theta_5$$

$$V_z = \sin \theta_{234} \sin \theta_5$$

$$W_x = -\cos \theta_1 \sin \theta_{234}$$

$$W_y = -\sin \theta_1 \sin \theta_{234}$$

$$W_z = -\cos \theta_{234}$$

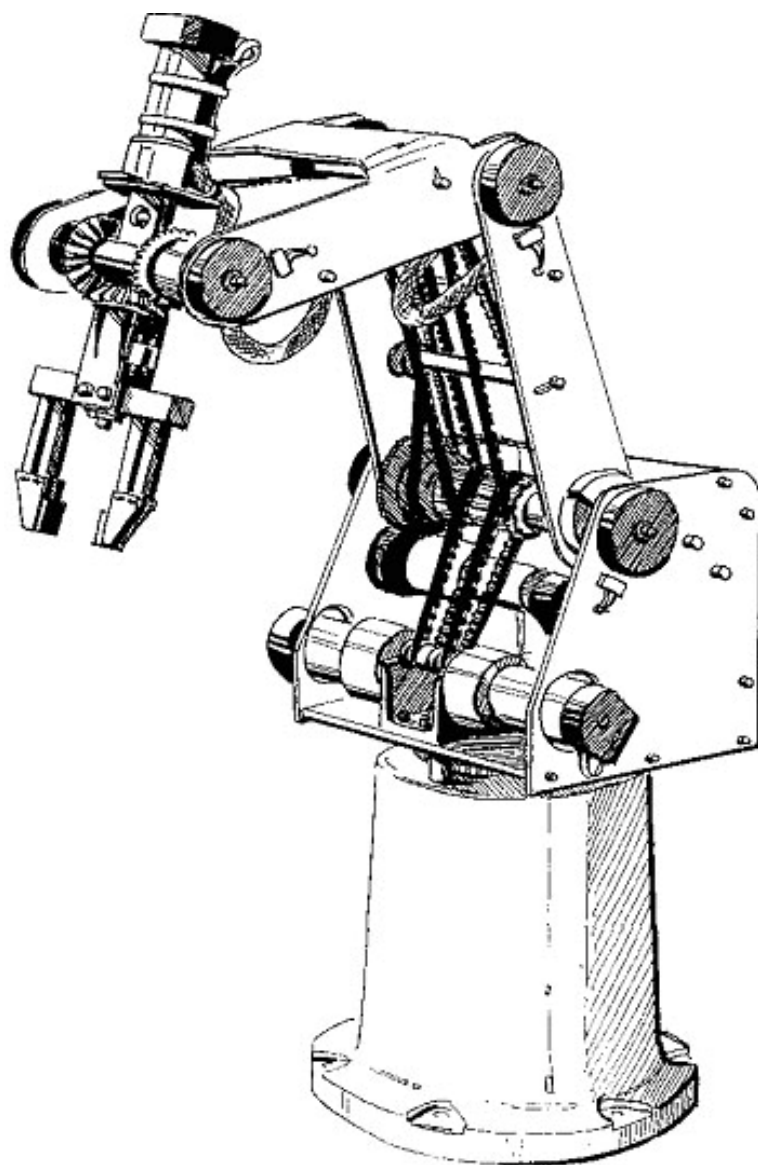
$$q_x = \cos \theta_1 (a_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_{23} - d_5 \sin \theta_{234})$$

$$q_y = \sin \theta_1 (a_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos \theta_{23} - d_5 \sin \theta_{234})$$

$$q_z = d_1 - a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin \theta_{23} - d_5 \cos \theta_{234}$$

ภาคผนวก ง  
รายละเอียดทางเทคนิคของแผนกทดสอบ

ในภาคผนวกนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดข้อมูลทางเทคนิค และส่วนประกอบต่างๆ ของแขนกลทดสอบแบบ Vertically Articulated ของบริษัท ESHED ROBOTEC INC โมเดล SCORBOT-ER III



รูปที่ ง.1 แขนกล SCORBOT-ER III

## ง.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของแขนกล

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกลทดสอบ

| รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของ แขนกล SCORBOT-ER III |                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mechanical Structure                              | Vertical articulated                                                                                                                                          |
| Number of Axes                                    | 5 axes plus servo gripper                                                                                                                                     |
| Axis Movement                                     |                                                                                                                                                               |
| Axis 1: Base rotation                             | 310°                                                                                                                                                          |
| Axis 2: Shoulder rotation                         | +130° / -35°                                                                                                                                                  |
| Axis 3: Elbow rotation                            | ±130°                                                                                                                                                         |
| Axis 4: Wrist pitch                               | ±130°                                                                                                                                                         |
| Axis 5: Wrist roll                                | Unlimited (mechanically); ±570° (electrically)                                                                                                                |
| Maximum Operating Radius                          | 610mm (24.4")                                                                                                                                                 |
| End Effector                                      | DC servo gripper, with optical encoder,<br>parallel finger motion;<br>Measurement of object's size/gripping force<br>by means of gripper sensor and software. |
| Maximum Gripper Opening                           | 75 mm (3") without rubber pads<br>65 mm (2.6") with rubber pads                                                                                               |
| Hard Home                                         | Fixed position on each axis, found by means of microswitches                                                                                                  |
| Feedback                                          | Optical encoder on each axis                                                                                                                                  |
| Actuators                                         | 12VDC servo motors                                                                                                                                            |
| Motor Capacity (axes 1-6)                         | 15 oz. in Peak Torque (stall)<br>70 W Power for Peak Torque                                                                                                   |
| Gear Ratios                                       | Motors 1, 2, 3: 127.1:1<br>Motors 4, 5: 65.5:1<br>Motor 6 (gripper) 19.5:1                                                                                    |
| Transmission                                      | Gears, timing belts, lead screw                                                                                                                               |
| Maximum Payload                                   | 1 kg (2.2 lb.), including gripper                                                                                                                             |
| Position Repeatability                            | ±0.5 mm (0.02") at TCP (tip of gripper)                                                                                                                       |
| Weight                                            | 11.5 kg (25 lb)                                                                                                                                               |
| Maximum Path Velocity                             | 600 mm/sec (23.6"/sec)                                                                                                                                        |
| Ambient Operating Temperature                     | 2°-40°C (36°-104°F)                                                                                                                                           |

## ง.2 โครงสร้างของแขนกลทดสอบ

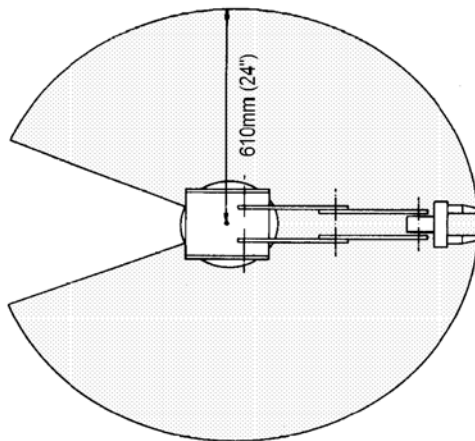
แขนกล SCORBOT-ER III เป็นแขนกลแบบ Vertically Articulated ที่มีข้อต่อแบบหมุน (revolute joint) จำนวน 5 ข้อต่อ รวมทั้งมีมือจับยึด (gripper) อยู่ที่ส่วนปลายของแขนกล แขนกลนี้มีทั้งหมด 5 องศาอิสระ โดยจะสังเกตุดำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ในพื้นที่ทำงานจากปลายแขนกล

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ

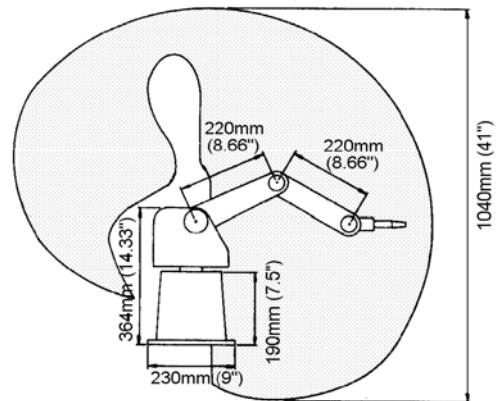
| Axis No. | Joint Name  | Motion                                        | Motor No. |
|----------|-------------|-----------------------------------------------|-----------|
| 1        | Base        | Rotates the body.                             | 1         |
| 2        | Shoulder    | Raises and lowers the upper arm.              | 2         |
| 3        | Elbow       | Raises and lowers the forearm.                | 3         |
| 4        | Wrist Pitch | Raises and lowers the end effector (gripper). | 4+5       |
| 5        | Wrist Roll  | Rotates the end effector (gripper).           | 4+5       |

## ง.3 พื้นที่ทำงานของแขนกลทดสอบ

พื้นที่ทำงานของแขนกลนั้นจะต้องดูจาก ความยาวของข้อต่อและองศาในการหมุนข้อต่อ ดังแสดงในรูปที่ ง.2 ซึ่งจะแสดงถึงขนาด และขอบเขตการทำงานของแขนกล



ก) พื้นที่ทำงาน (มุมมองด้านบน)



ข) พื้นที่ทำงาน (มุมมองด้านข้าง)

รูปที่ ง.2 ขนาดและขอบเขตการทำงานของแขนกล

ภาคผนวก จ

รายละเอียดทางเทคนิคของกล่องที่ใช้ในการทดสอบ

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดข้อมูล และคุณสมบัติของกล้องที่นำมาใช้ในการทดสอบ และรวมไปถึงขนาดความกว้างและความยาวของตัวกล้อง

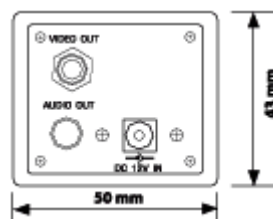


รูปที่ จ.1 กล้องที่นำมาทดสอบ

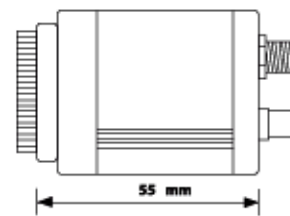
### จ.1 ข้อมูลคุณลักษณะ

- 1/4 SONY Color CCD image sensor
- Auto Electric Shutter (AES), Auto Gain Control (AGC)
- Auto White Balance (AWB)
- Auto Back Light Compensation (ALC)
- Built – in Microphone and Audio Amplifier
- Built – in Anti – Aliasing and IR – out Optical Filter

### จ.2 ขนาดของตัวกล้อง



ก) รายละเอียดตัวกล้อง (มุมมองด้านหลัง)



ข) รายละเอียดตัวกล้อง (มุมมองด้านข้าง)

รูปที่ จ.2 รายละเอียดขนาดของตัวกล้อง



### จ.3 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิค

ตารางที่ จ.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของกล้องทดสอบ

|                         |                                                                      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Image Pick-up Device    | 1/4" SONY Color CCD Image sensor                                     |
| Picture Element         | 512(H)x582(V) Pixel                                                  |
| Horizontal Resolution   | 330 TV Lines                                                         |
| Minimum Illumination    | 0.5Lux @ F2.0                                                        |
| More then 48dB          | More then 48dB                                                       |
| Auto Electronic Shutter | 1/50s - 1/110,000s                                                   |
| Lens Mount              | C or CS Mount adjustable                                             |
| Auto Gain Control       | Yes                                                                  |
| Auto White Balance      | Yes                                                                  |
| Back Light Compensation | Auto detect                                                          |
| Gamma Characteristic    | 0.45                                                                 |
| Synchronous System      | Internal Negative sync.                                              |
| Video Output            | 1V <sub>p-p</sub> / 75 Ohms, BNC or F connector                      |
| Audio                   | Microphone+Amplifier (2V <sub>p-p</sub> , 50 Ohms).<br>RCA connector |
| Power Source            | 12V DC +- 10%, 150mA                                                 |
| Operating Temperature   | -10 C to 50 C                                                        |
| Dimension (mm)          | 55(L)x50(W)x43(H)                                                    |
| Weight                  | 185g                                                                 |

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “Visual Servo Control Using Stereo Image Jacobian” 8th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation (ACMOS '06), 12-14 March 2006

## ประวัติผู้เขียน

นายอัศวิน แซ่ตั้ง เกิดเมื่อวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้สอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมีผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ.